



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«МИРЭА – Российский технологический университет»

РТУ МИРЭА

Институт кибернетики (ИК)

Кафедра высшей математики (ВМ)

РАБОТА ДОПУЩЕНА К ЗАЩИТЕ

Заведующий

кафедрой _____ Ю.И.Худак

«____» _____ 2020 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

по направлению подготовки бакалавров

01.03.02 «Прикладная математика и информатика»

На тему: Современные методы растеризации трехмерных сцен.

Обучающийся:

подпись

Гогинян Б.А.

Шифр 17K9900

Группа КМБО-03-16

Руководитель работы

подпись

канд. техн. наук,
доцент, доцент

Парфенов Д.В.

Москва 2020



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«МИРЭА – Российский технологический университет»

РТУ МИРЭА

Институт кибернетики
Кафедра высшей математики

СОГЛАСОВАНО

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий
кафедрой _____ Ю.И. Худак

Директор
института _____ М.П. Романов

«_____» _____ 2020 г.

«_____» _____ 2020 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы бакалавра

Обучающийся: Гогинян Борис Андреевич

Шифр: 17K9900

Направление подготовки 01.03.02 «Прикладная математика и информатика»

Группа КМБО-03-16

1. Тема выпускной квалификационной работы:

Современные методы растеризации трехмерных сцен

2. Цель и задачи выпускной квалификационной работы

Цель работы: сравнить алгоритмы трассировки лучей, реализованные в различных бесплатных программных пакетах для трехмерной визуализации.

Задачи работы:

- 1 Построить несколько трехмерных моделей сцен с помощью различных программных пакетов.
2. Произвести настройку параметров пакетов таким образом, чтобы получить идентичные максимально близкие изображения каждой сцены.
3. Построить эталонное изображение, с которым будет проводиться сравнение результатов работы сравниваемых программных пакетов.
4. Запустить отрисовку с ограничением по времени работы и/или по количеству задействуемых потоков.
5. Построить графики зависимости скорости от количества потоков и зависимости качества построенного изображения от времени работы с помощью метрики PSNR.

3. Этапы выполнения выпускной квалификационной работы бакалавра

№ этапа	Содержание этапа ВКР	Результат выполнения этапа ВКР	Срок выполнения
1	Работа с литературой по теме ВКР	Обзор литературы по физически корректному рендерингу	04.03.2020
2	Построение трехмерных сцен	Пять трехмерных сцен Настройка идентичных параметров для каждого из исследуемых рендеров	25.03.2020
3	Получение результатов экспериментов	Изображения, построенные за ограниченное время с использованием распараллеливания на 6 или 12 потоков Сравнение времени построения изображений при распараллеливании на 6 или 12 потоков Оценка качества экспериментальных изображений в сравнении с эталонным	15.04.2020
4	Подготовка презентации работы	Презентация	23.05.2020
5	Оформление работы	Оформленный текст ВКР	01.06.2020

4. Перечень разрабатываемых документов и графических материалов

1. Построение эталонных изображений для трехмерных сцен, используемых для сравнения программных пакетов.
2. Построение изображений трехмерных сцен с помощью сравниваемых программных пакетов при ограничении по времени работы.
3. Построение изображений трехмерных сцен с помощью сравниваемых программных пакетов при использовании распараллеливания.
4. Сравнение результатов работы исследуемых программных пакетов по времени и качеству построенных изображений

5. Руководитель и консультанты выпускной квалификационной работы

Функциональные обязанности	Должность в Университете	Ф.И.О.	Подпись
Руководитель выпускной работы	доцент	Парфенов Денис Васильевич	

Задание выдал

Задание принял к исполнению

Руководитель ВКР  Д.В. Парфенов

Обучающийся _____ Б.А. Гогинян

« _____ » _____ 2020 г.

« _____ » _____ 2020 г.

Аннотация

Выпускная квалификационная работа содержит 56 страниц, 13 рисунков, 42 источника, 2 приложения.

Ключевые слова: рендеринг, алгоритм трассировки пути, алгоритм stochastic progressive photon mapping, алгоритм Bidirectional path tracing, рендер appleseed, рендер LuxCore, рендер Cycles.

Объектом исследования данной работы являются различные бесплатные программные пакеты для растеризации трехмерных сцен и алгоритмы трассировки лучей, реализованные в них.

Целью работы является сравнение реализованных алгоритмов трассировки лучей, использующихся в различных бесплатных программах для трехмерной визуализации, по качеству получаемого изображения относительно времени, затраченного на рендеринг.

В ходе работы были:

1. Построены и настроены идентичные экспериментальные модели разных рендеров для сравнения с эталонным изображением. Получено более 70 экспериментальных изображений, 5 эталонных.
2. Получены графики, отображающие различие между эталонным изображением и экспериментальным в зависимости от времени и графики, отображающие процентное соотношение скорости при 6 потоках и при 12.

Научная новизна исследования определяется тем, что на основе прямого практического применения рендеров исследуются их возможности и возможности алгоритмов трассировки, реализованных в них.

Научно-практическая значимость результатов, заключается в возможности выбора потенциальным пользователем необходимого под его нужды конкретного бесплатного программного обеспечения. Также выводы, сделанные из результатов исследования, помогают понять и классифицировать алгоритмы по применимости к различным видам сцен и моделей.

Оглавление

Определения и обозначения.....	5
Введение.....	6
Глава 1 Обзор источников.....	7
1.1 Физические модели и законы.....	7
1.2 Уравнение рендеринга и PBR.....	12
1.3 Рендеры и алгоритмы трассировки.....	26
▪ Оптимизационные методы.....	30
1.4 Способ сравнения и метрика PSNR.....	34
Глава 2 Эксперименты.....	35
▪ 1 эксперимент.....	35
▪ 2 эксперимент.....	35
▪ 3 эксперимент.....	36
▪ 4 эксперимент.....	37
▪ 5 эксперимент.....	38
Глава 3 Построение графиков, сравнение, выводы.....	40
▪ 1 эксперимент.....	40
▪ 2 эксперимент.....	42
▪ 3 эксперимент.....	44
▪ 4 эксперимент.....	45
▪ 5 эксперимент.....	46
4 Заключение.....	48
5 Список использованных источников	49
6 Приложение А.....	52
7 Приложение В.....	54

Определения и обозначения

Сокращение	Расшифровка
PBR	Physically-based rendering (рус. Физически-корректный рендеринг)
BSDF	Bidirectional scattering distribution function (рус. Двулучевая функция распределения рассеивания)
BRDF	Bidirectional reflectance distribution function (рус. двулучевая функция отражательной способности)
BTDF	Bidirectional transmittance distribution function (рус. Двулучевая функция пропускной способности)
BSSRDF	bidirectional scattering surface reflectance distribution function (рус. двулучевая функция распределения подповерхностного рассеивания)
PSNR	peak signal-to-noise ratio (рус. отношение пикового сигнала к шуму)
PM	Photon Mapping (рус. Метод фотонных карт)
PPM	Progressive Photon Mapping (рус. Прогрессивный метод фотонных карт)
SPPM	Stochastic Progressive Photon Mapping (рус. Стохастический прогрессивный метод фотонных карт)
BDPT	Bidirectional path-tracing (рус. двунаправленная трассировка пути)

Введение

На сегодняшний день существует много программ трехмерной визуализации, которые используют для реалистичного синтеза различные алгоритмы трассировки лучей. Эти программы применяются в кино- и телеиндустрии, дизайне, архитектуре и т.п. На сегодняшний день наибольшей популярностью пользуются платные пакеты, такие как Maxwell Render, Lumion, Solidworks Visualize, Marmoset Toolbag, Corona Render, Iray, V-Ray, Indigo Render. Для независимых разработчиков и некоторых молодых компаний значительный расход средств на их приобретение может быть критическим, поэтому они склонны искать бесплатные аналоги. К счастью, такие существуют, но тогда встает вопрос о качестве их работы. Помимо цены, важными остаются такие характеристики, как время рендеринга и фотореалистичность получающегося изображения. Также важным фактором для времени работы выступает реализация распараллеливания алгоритмов рендеринга. Благодаря идее имитации пути нескольких световых лучей они легко поддерживают эту возможность. С позиций требуемой вычислительной мощности процессоров актуально рассмотреть и реализацию многопоточности у этих алгоритмов.

Таким образом, **актуальность** заключается в том, что в данной работе сравниваются эти характеристики у некоторых популярных бесплатных рендеров и исследуется их оптимальная применимость к визуализации различных световых явлений.

Объектом исследования в данной работе являются программные средства компьютерной графики, а **предметом** – алгоритмы трассировки лучей и их реализация.

Цель исследования: сравнить алгоритмы трассировки лучей, реализованные в различных бесплатных программах для трехмерной визуализации.

Задачи:

1. построить трехмерные сцены;
2. настроить идентичные параметры для каждой сцены;
3. получить эталонное изображение, с которым будет проводится сравнение;
4. запустить рендер с ограничением по времени и/или потокам;
5. построить графики скорости и качества с помощью метрики PSNR.

Глава 1 Обзор источников

Глава 1.1. Физические модели и законы

Перед тем, как говорить о реалистичном отображении внешнего мира определимся с понятием «реалистичность». Для реалистичного рендеринга алгоритмам необходимо руководствоваться законами физической оптики, т.е. корпускулярно-волновыми свойствами света, а также законами взаимодействия света с различными поверхностями.

Законы геометрической оптики

Геометрическая оптика описывает распространение электромагнитного поля как распространение лучей в пространстве. Луч – это линия (кривая или прямая), вдоль которой распространяется энергия светового поля.

1. Закон прямолинейного распространения света (принцип Ферма)

Оптическая длина луча (произведение геометрического пути светового луча и показателя преломления среды, в которой распространяется свет) между двумя точками минимальна по сравнению со всеми другими линиями, соединяющими эти две точки. Отсюда очевидно следует, что в однородной среде световой луч движется по прямой линии.

2. Закон независимого распространения лучей

Если через точку пространства проходит несколько лучей, то каждый луч никак не влияет на любой другой луч. То есть он ведет себя так, будто бы никаких других лучей нет.

3. Закон преломления света (Закон Снеллиуса)

При переходе светового луча из одной среды в другую, на границе двух сред световой луч разделяется на два: отраженный и преломленный. Угол падения света на поверхность связан с углом преломления соотношением:

$$n_1 \cos \alpha = n_2 \cos \beta$$

где n_1 – показатель преломления первой среды;

n_2 – показатель второй среды, в которую свет попадает, пройдя границу раздела;

α – угол между падающим лучом и нормалью к поверхности в первой среде;

β – угол между лучом и нормалью к поверхности во второй среде.

4. Законы отражения света

1) Диффузное отражение. При отражении света от шероховатой поверхности лучи отражаются в разные стороны.

- 2) Зеркальное отражение. Падающий и отраженный лучи, а также нормаль к отражающей поверхности в точке падения лежат в одной плоскости и угол падения равен углу отражения.
- 3) Полное внутреннее отражение. Ситуация, при которой интенсивность преломленного луча становится нулевой. Возникает на границе двух сред, где волна падает из среды с большим показателем преломления (т.е. более плотной).

5. Закон обратимости светового луча.

Траектория пути лучей не зависят от направления распространения. Другими словами, если луч, выпущенный из точки А в точку Б, пустить в обратном направлении от Б к А, то он будет иметь точно такую же траекторию.

Все законы геометрической оптики следуют из закона сохранения энергии. Также они не являются независимыми друг от друга [2].

Электромагнитные свойства света

Свет (или световое поле) – это электромагнитные волны в оптическом диапазоне длин волн λ (0 – 40 мкм). В этом диапазоне выполняются законы геометрической оптики и свет слабо взаимодействует с веществом. Оптический диапазон состоит из 4 видов излучения: рентгеновское, ультрафиолетовое, инфракрасное и видимое. В данной работе имеет значение только последнее.

Видимое излучение – отраженный от разных поверхностей свет видимого диапазона, лежащий в пределах от 380 нм до 780 нм [1].

Дифракция

Под дифракцией света понимают всякое отклонение от прямолинейного распространения света, если оно не может быть истолковано как результат отражения, преломления или изгибания световых лучей в средах с непрерывно меняющимся показателем преломления. Если в среде имеются мельчайшие частицы постороннего вещества (туман) или показатель преломления заметно меняется на расстояниях порядка длины волны, то в этих случаях говорят о рассеянии света [1].

Интерференция и когерентность

Колебания (и волны) называются когерентными, если разность их фаз δ постоянна во времени [1]. Если оба колебания не согласованы друг с другом т.е. разность их фаз δ как-то изменяется во времени, то такие колебания называют некогерентными. При суперпозиции когерентных волн происходит перераспределение интенсивности I в пространстве: в одних местах возникают

максимумы, в других минимумы интенсивности. Такое явление называется интерференцией волн.

Принцип Гюйгенса-Френеля

Окружим все источники света $S1, S2, S3, \dots$ произвольной замкнутой поверхностью F . Каждую точку такой поверхности можно рассматривать как источник вторичных волн, распространяющихся во всех направлениях. Эти волны когерентны, поскольку все они возбуждаются одними и теми же первичными источниками. Световое поле, возникающее в результате их интерференции, в пространстве вне поверхности F совпадает с полем реальных источников света. [1]

Таким образом, действительные источники света можно как бы заменить окружающей их светящейся поверхностью F с непрерывно распределенными по ней когерентными вторичными источниками. Отличие этой поверхности от реальной поверхности излучающего тела состоит в том, что она абсолютно прозрачна для всякого излучения. В такой формулировке принцип Гюйгенса-Френеля выражает весьма общее положение. Он означает, что волна, отделившаяся от своих источников, в дальнейшем ведет автономное существование, совершенно не зависящее от наличия источников.

Каустики

Каустика – это огибающая световых лучей, преломленных или отраженных от некоторой кривой поверхности или объекта, или это проекция этой огибающей на другую поверхность. Каустика возникает из-за концентрации световых лучей в определенной точке. [1]

Закон Ламберта

Закон Ламберта утверждает, что интенсивность излучения, отражаемая от идеальной диффузной поверхности (или излучаемая идеальным диффузным источником), прямо пропорциональна косинусу угла θ между направлением падающего света и нормалью к поверхности. [2]

Уравнения Френеля

Уравнения Френеля описывают зависимость амплитуды электрического (магнитного) поля падающей волны и полей отраженной и преломленной волн [1]:

$$r_{\perp} \equiv \frac{R_{\perp}}{\mathcal{E}_{\perp}} = \frac{n_1 \cos \varphi - n_2 \cos \psi}{n_1 \cos \varphi + n_2 \cos \psi},$$
$$d_{\perp} \equiv \frac{D_{\perp}}{\mathcal{E}_{\perp}} = \frac{2n_1 \cos \varphi}{n_1 \cos \varphi + n_2 \cos \psi},$$

$$r_{\parallel} \equiv \frac{R_{\parallel}}{\mathcal{E}_{\parallel}} = \frac{n_2 \cos \varphi - n_1 \cos \psi}{n_2 \cos \varphi + n_1 \cos \psi},$$

$$d_{\parallel} \equiv \frac{D_{\parallel}}{\mathcal{E}_{\parallel}} = \frac{2n_1 \cos \varphi}{n_2 \cos \varphi + n_1 \cos \psi}.$$

Здесь r_{\perp} — составляющая отраженной волны, лежащая перпендикулярно плоскости падения;

d_{\perp} — составляющая преломленной волны, лежащая перпендикулярно плоскости падения;

r_{\parallel} — составляющей отраженной волны, лежащая в плоскости падения;

d_{\parallel} — составляющей преломленной волны, лежащая в плоскости падения;

R_{\perp} — амплитуда составляющей отраженной волны, лежащая перпендикулярно плоскости падения;

R_{\parallel} — амплитуда составляющей отраженной волны, лежащая в плоскости падения;

D_{\perp} — амплитуда составляющей преломленной волны, лежащая перпендикулярно плоскости падения;

D_{\parallel} — амплитуда составляющей преломленной волны, лежащая в плоскости падения
амплитуда составляющей отраженной волны, лежащая перпендикулярно плоскости падения;

\mathcal{E}_{\perp} — амплитуда составляющей падающей волны, лежащая перпендикулярно плоскости падения;

\mathcal{E}_{\parallel} — амплитуда составляющей падающей волны, лежащая в плоскости падения

φ — угол падения, ψ — угол преломления;

n_1, n_2 — показатели преломления 1-й и 2-й сред.

Эти отношения называются коэффициентами Френеля. При обыкновенном отражении угол ψ , а с ним и все коэффициенты Френеля вещественны. При скользящем падении, когда угол φ близок к 90° , отражение практически полное.

$$\frac{R_{\perp}}{\mathcal{E}_{\perp}} = \frac{R_{\parallel}}{\mathcal{E}_{\parallel}} \rightarrow -1$$

С этим связана видимость подводных объектов близко к наблюдателю и постепенным «размытием» при отдалении. Этим же объясняется, почему изображение заходящего солнца в тех же условиях по яркости почти не уступает самому солнцу.

Подповерхностное поглощение и рассеяние света

При прохождении электромагнитной волны света через какое-либо вещество энергия этой волны расходуется на возбуждение колебаний электронов. Часть этой энергии переходит в другие виды энергии, а часть возвращается в виде вторичных волн, вызванных колебанием. Тут следует учесть взаимную интерференцию таких

волн: в однородной среде вторичные волны полностью гасят друг друга, поэтому рассеяние света возникает только в неоднородной среде. Дифракционная картина в такой среде выглядит как равномерное распределение интенсивности света во всех направлениях и называется рассеянием света. Поглощением же света называется явление уменьшения энергии и, вследствие, интенсивности, световой волны при ее распространении в веществе из-за преобразования энергий. [2]

В настоящее время не существует способа полностью симитировать сложное поведение света, учитывая все его физические свойства. Однако в 1986 году на конференции SIGGRAPH Джеймс Т. Каджия [4] представил интегральное уравнение, которое является основой для имитирования любых физически-корректных материалов. Подробно о нем на стр. 13.

Глава 1.2 Уравнение рендеринга и PBR.

Энергетическая яркость

Энергетическая яркость – радиометрическая величина, которая характеризует наблюдаемую энергию, другими словами, количество света, на некоторой площади. Чтобы дать точное определение, необходимо предварительно разъяснить следующие понятия:

1. Телесный угол ω – это объемный угол, который характеризует долю пространства, которая может быть спроецирована на некоторую поверхность, обычно сферу, площади S (рис. 1). Мерой такого угла является отношение площади S к квадрату радиуса сферы r : $\omega = \frac{S}{r^2}$. В системе СИ поверхность с площадью r^2 вырезанная из сферы радиуса r является телесным углом в 1 Стерadian.

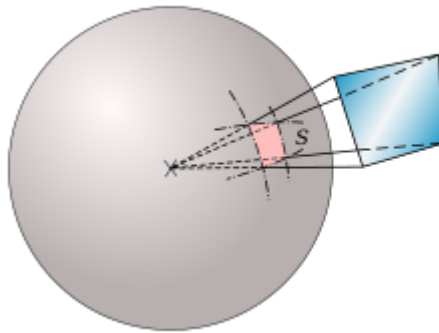


Рис. 1 Телесный угол

2. Поток излучения Φ – мощность излучения, определяемая отношением энергии, переносимой излучением, ко времени переноса, значительно превышающему период электромагнитных колебаний. Энергия, испускаемая источником света, представляется как функция, зависящая от длин волн. Однако использование самих длин волн в компьютерной графике нецелесообразно, поэтому используются упрощения, такие как RGB.

3. Сила излучения I – физическая величина, определяемая отношением потока излучения Φ , распространяющегося от источника излучения внутри малого телесного угла ω , содержащего рассматриваемое направление, к этому углу:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

Энергетическая яркость (или лучистость) – физическая величина, определяемая отношением потока излучения Φ к произведению телесного угла ω , в котором он распространяется, и проекции площади A , излучающего элемента поверхности на плоскость, перпендикулярную нормали к поверхности:

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA d\omega}$$

Уравнение рендеринга

Уравнение рендеринга вычисляет энергетическую яркость точки поверхности x , исходящую в направлении ω_0 (направление условного наблюдателя), как сумму собственной энергетической яркости поверхности L_e и отраженного излучения, которое выражается интегралом (1). В частности, когда поверхность не излучает свет, т.е. при $L_e = 0$, выходит *уравнение отражения*.

$$L_0(x, \vec{\omega}_0) = L_e(x, \vec{\omega}_0) + \int_{\Omega} (f_r(x, \vec{\omega}_0, \vec{\omega}_i) \cdot L_i(x, \vec{\omega}_i) \cdot (\vec{\omega}_i, \vec{n})) d\omega_i \quad (1)$$

Поверхность S телесного угла принимается бесконечно малой и фактически он становится вектором направления $\vec{\omega}$, а поверхность A – точкой x .

В интеграле:

- 1) $\int_{\Omega} (...) d\vec{\omega}_i$ – интеграл по полусфере $\Omega = S^2$, необходимый для учета всех входящих векторов $\vec{\omega}_i$,
- 2) $L_i(x, \vec{\omega}_i)$ – энергетическая яркость падающего света в точку x , направленная вдоль вектора $\vec{\omega}_i$,
- 3) $(\vec{\omega}_i, \vec{n}) = \cos \theta_i$ – скалярное произведение векторов, которое обозначает угол между входящим (падающим) вектором $\vec{\omega}_i$ и вектором нормали к поверхности \vec{n} ,
- 4) $f_r(x, \vec{\omega}_0, \vec{\omega}_i) = \frac{dL_0}{L_i \cdot \cos \theta_i d\omega_i}$ – двулучевая функция отражательной способности (англ. Bidirectional reflectance distribution function [BRDF]).
- 5) Также существует BTDF (bidirectional transmittance distribution function) – Двулучевая функция пропускной способности, которая определяет количество поглощенного света и BSDF (Bidirectional Scattering Distribution Function) – Двулучевая функция распределения рассеивания, которая объединяет BRDF и BTDF и которая также, в зависимости от реализации, подставляется в уравнение рендеринга. Более конкретно об этом далее.

Аналитического решения этого уравнения нет.

Уравнение рендеринга не учитывает некоторых физических явлений света, например:

- Коэффициент прохождения волн;
- Подповерхностное рассеивание;
- Поляризацию;
- Интерференцию.

Но это практически не влияет на качество получаемых изображений.

PBR или Физически-корректный рендеринг

Physically-Based Rendering – концепция, которая основываясь на физических законах, стремится добиться максимальной реалистичности в симулировании материалов и, тем самым, фотореалистичности получаемых рендерингом изображений. Физически-корректное моделирование свойств материала основано на таких понятиях, как:

- 1) Теория микрограней – когда поверхность имеет микроскопические неровности;
- 2) Закон сохранения энергии – когда поверхность не может отразить больше энергии, чем принимает;
- 3) Закон Френеля – когда поверхности имеют разную отражательную способность в зависимости от угла просмотра;
- 4) Альбедо – учет отражения материалом волн определенной длины, другими словами, чистый цвет;
- 5) Проводник/диэлектрик – учет способности проводников и диэлектриков по-разному отражать свет, (60-90%) и (0-20%) соответственно.

Теория микрограней (Microfacet Theory)

В основе этой теории лежит представление о поверхности сред, как поверхности с микроскопическими неровностями, но, тем не менее, достаточно большими, по сравнению с длиной волны [3]. При падении световых лучей на такую поверхность может возникнуть три ситуации:

1. Самозатенение (англ. self shadowing) – луч света не долетает до поверхности, от которой он должен отразиться;
2. Самоперекрытие (англ. masking) – отраженный луч сталкивается с препятствием и не вылетает;
3. Многократное отражение (англ. retroreflection) – ситуация, когда луч отражается от поверхности несколько раз, перед тем как улететь.

Таким образом, если микрограни ориентированы в разные стороны, то лучи рассеиваются в разные стороны – поверхность более шероховатая. В компьютерной графике используется коэффициент шероховатости, число принадлежащее отрезку $[0, 1]$, применяемое к медианному вектору h . Он определяет количество микрограней, направленных вдоль него: чем их меньше, тем более шероховатая поверхность.

Вектор $h = \frac{\omega_0 + \omega_i}{\|\omega_0 + \omega_i\|}$, где

- ω_0 – вектор, направленный в сторону наблюдателя;
- ω_i – вектор, направленный вдоль падающего света.

Закон сохранения энергии

Как уже упоминалось ранее, при столкновении с поверхностью часть света отражается, а часть поглощается. Из этого очевидно следует простой вывод: свет,

который отражается от поверхности никак не может быть ярче света, который на нее падает.

Это реализуется за счет аналогичного разделения на зеркальную, которая отвечает за отражение, и диффузную, которая соответствует поглощению, компоненты. Тут следует уточнить, что концепция PRB не учитывает вторичные волны, т.е. подповерхностное рассеивание, которое реализуется другими способами, например, с помощью функции BSSRDF (Bidirectional Surface Scattering Distribution Function) - Двухнаправленная Функция Поверхностного Рассеивания и Распределения [5].

Альбедо

Альбедо (англ. Albedo) – характеристика диффузной отражательной способности поверхности. Это отношение отражённого (рассеянного) потока излучения к потоку падающего излучения. В компьютерной графике реализуется с помощью *карт альбедо* – текстур, содержащих только информацию о цвете поверхности в виде тройки RGB для каждого пикселя [6].

Металлы

Геометрические законы отражения света от металлов такие же, что и для непоглощающих сред. Различие есть лишь в законах преломления. Преломленные волны затухают очень быстро, что по сути означает, что у металлов нет вторичных волн, а, следовательно, рассеивания. Таким образом у металлических поверхностей нет диффузной компоненты, а есть только зеркальная.

Ядром Физически-Корректного рендеринга является уравнение рендеринга и функция BSDF. Последняя определяет, как свет взаимодействует с веществом. Существует большое количество разных вариантов этой функции и от неё и ее реализации сильно зависит реалистичность поверхности. Другими словами, она является определяющей материала. В данной работе подробно рассмотрены только некоторые из этих вариантов, в контексте исследуемых рендеров и алгоритмов.

Двулучевая функция распределения рассеивания (BSDF)

BSDF – функция, которая на основе свойств поверхности, определяет количество отраженного света, другими словами, вклад, который вносит каждый падающий луч ω_i . Она является характеристикой конкретной поверхности, возвращает долю энергии, отраженной от материала в зависимости от направления ω_0 . Для того чтобы заданная BSDF считалась физически корректной, она должна удовлетворять двум базовым требованиям – принципу взаимности Гельмгольца (Helmholtz reciprocity) и закону сохранения энергии [20]:

1. Принцип взаимности Гельмгольца говорит о том, что если мы обратим направление движения света (т. е. поменяем местами источник и приемник света), то ничего не изменится, другими словами, BRDF симметрична:

$$f_r(\vec{\omega}_0, \vec{\omega}_i) = f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_0)$$

2. Поверхность не может отражать больше световой энергии, чем на нее падает. Вся падающая световая энергия может быть выражена в виде интеграла по верхней полусфере S^2 :

$$\int_{S^2} f_r(x, \vec{\omega}_0, \vec{\omega}_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\omega_i$$

В рендерах BSDF реализуется посредством шейдеров – самостоятельных программ, которые принимают множество параметров, определяющих оптические свойства поверхности. Рассмотрим виды, особенности и реализации данной функции, используемые в исследовании.

В рендере **appleseed**:

1. Physically-based glass BSDF

Данная функция используется в шейдере asGlass. Она реализована, основываясь на статье [3]. Все нижеследующие обозначения взяты оттуда.

f_s – BSDF, f_r – BRDF, f_t – BTDF.

$f_s(\mathbf{o}, \mathbf{i}, \mathbf{m}) = f_r(\mathbf{o}, \mathbf{i}, \mathbf{m}) + f_t(\mathbf{o}, \mathbf{i}, \mathbf{m})$, где

\mathbf{o} – вектор, направленный в сторону отражения;

\mathbf{i} – вектор направления падающего луча;

\mathbf{m} – вектор микронормали, т.е. нормали к конкретной микрогранице.

f_r регулирует отраженный свет и имеет вид:

$$f_r(\mathbf{o}, \mathbf{i}, \mathbf{n}) = \frac{F(\mathbf{i}, \mathbf{h}_r)G(\mathbf{i}, \mathbf{o}, \mathbf{h}_r)D(\mathbf{h}_r)}{4|\mathbf{i} \cdot \mathbf{n}||\mathbf{o} \cdot \mathbf{n}|}$$

\mathbf{n} – усредненный, по сути, обычный вектор нормали к поверхности;

$\mathbf{h}_r = \mathbf{h}_r(\mathbf{i}, \mathbf{o}) = \frac{\vec{h}_r}{\|\vec{h}_r\|}$, где $\vec{h}_r = \text{sign}(\mathbf{i} \cdot \mathbf{n})(\mathbf{i} + \mathbf{o})$ – нормализованный вектор;

\vec{h}_r – вектор направления отраженного луча.

Данная модель функции называется BRDF Кука-Торренса. [17]

f_t регулирует преломленные лучи и имеет вид:

$$f_t(\mathbf{o}, \mathbf{i}, \mathbf{n}) = \frac{|\mathbf{i} \cdot \mathbf{h}_t| |\mathbf{o} \cdot \mathbf{h}_t| \eta_o^2 (1 - F(\mathbf{i}, \mathbf{h}_t)) G(\mathbf{i}, \mathbf{o}, \mathbf{h}_t) D(\mathbf{h}_t)}{|\mathbf{i} \cdot \mathbf{n}| |\mathbf{o} \cdot \mathbf{n}| (\eta_i (\mathbf{i} \cdot \mathbf{h}_t) + \eta_o (\mathbf{o} \cdot \mathbf{h}_t))}$$

η_o – Показатель преломления второй среды, в которую преломился луч;

η_i – Показатель преломления первой среды, в которую луч отразился;

$\mathbf{h}_t = \mathbf{h}_t(\mathbf{i}, \mathbf{o}) = \frac{\vec{\mathbf{h}}_t}{\|\mathbf{h}_t\|}$, где $\vec{\mathbf{h}}_t = -(\eta_i \mathbf{i} + \eta_o \mathbf{o})$ – нормализованный вектор;

$\vec{\mathbf{h}}_t$ – вектор направления преломленного луча.

$F(\mathbf{i}, \mathbf{h})$ – функция уравнения Френеля (Fresnel equation).

Уравнения Френеля описывают отношение отраженного и преломленного света, которое зависит от угла, под который мы смотрим на поверхность. Так как они слишком сложны для вычислений, функция F является аппроксимацией. Она возвращает процент отраженного света на основании угла, под которым камера видит эту поверхность. Следующее выражение является удобной точной формулировкой для диэлектриков и неполяризованного света:

$$F(\mathbf{i}, \mathbf{m}) = \frac{(g - c)^2}{2(g + c)^2} \left(1 + \frac{(c(g + c) - 1)^2}{(c(g - c) + 1)^2} \right)$$

где $g = \sqrt{\frac{\eta_t^2}{\eta_i^2} - 1 + c^2}$; $c = |\mathbf{i} \cdot \mathbf{m}|$;

η_t – Показатель преломления второй среды, в которую преломился луч;

η_i – Показатель преломления первой среды.

$G(\mathbf{i}, \mathbf{o}, \mathbf{h})$ – функция геометрии (Geometry function), которая статистически аппроксимирует относительную площадь поверхности, где происходит самозатенение и перекрытие. Эта функция зависит от функции нормального распределения D и деталей микроповерхности. В общем случае используется приближение Смита [10], которое аппроксимирует двунаправленное самозатенение и перекрытие с помощью двух однонаправленных коэффициентов, возвращаемых G_1 :

$$G(\mathbf{i}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) \approx G_1(\mathbf{i}, \mathbf{m}) G_1(\mathbf{o}, \mathbf{m})$$

где G_1 зависит от функции нормального распределения D .

$D(\mathbf{h})$ – функция нормального распределения (Normal Distributions Functions). Она аппроксимирует количество микрограней поверхности, ориентированных по медианному вектору, основываясь на шероховатости поверхности (это основная

функция, аппроксимирующая микрограницы). Существует несколько вариантов функций распределения, которые дают немного разный результат. В шейдере можно выбрать какой-нибудь из них.

1) Распределение Бэкманна (Beckmann):

$$D(\mathbf{m}) = \frac{\chi^+(\mathbf{m} \cdot \mathbf{n})}{\pi \alpha_b^2 \cos^4 \theta_m} e^{\frac{-\tan^2 \theta_m}{\alpha_b^2}}$$

где $\chi^+(a) = \begin{cases} 1, & a > 0 \\ 0, & a < 0 \end{cases}$; (т.е. $D(\mathbf{m})=0$ если $\mathbf{m} \cdot \mathbf{n} \leq 0$)

$\theta_m = \arctan \sqrt{-\alpha_b^2 \log(1 - \xi_1)}$ – угол между \mathbf{m} и \mathbf{n} ;

ξ_1 – равномерно распределенная случайная величина на интервале (0, 1];

α_b – параметр шероховатости для распр. Бэкманна;

Соответствующая D функция G_1 :

$$G_1(\mathbf{v}, \mathbf{m}) = \chi^+\left(\frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{m}}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}}\right) \frac{2}{1 + \operatorname{erf}(a) + \frac{1}{a\sqrt{\pi}} e^{-a^2}},$$

где $a = (\alpha_b \tan \theta_v)^{-1}$;

$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx$ – функция погрешности;

χ^+ – выполняет условие однонаправленность (т.е. вектор \mathbf{v} находится на одной стороне микро- и макроповерхности).

Существует аппроксимация, которая приводится в статье [3], с погрешностью менее 0.35 %:

$$G_1(\mathbf{v}, \mathbf{m}) = \chi^+\left(\frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{m}}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}}\right) \begin{cases} \frac{3.535a + 2.181a^2}{1 + 2.276a + 2.577a^2}, & a < 1.6 \\ 1, & \text{в другом случае} \end{cases}$$

2) Распределение Фонга (Phong):

$$D(\mathbf{m}) = \chi^+(\mathbf{m} \cdot \mathbf{n}) \frac{\alpha_p + 2}{2\pi} (\cos \theta_m)^{\alpha_p}$$

α_p - параметр шероховатости для распр. Фонга;

Функция $G_1(\mathbf{v}, \mathbf{m})$ такая же, как и в распределении Бэкманна, за исключением

того, что $a = \frac{\sqrt{0.5\alpha_p+1}}{\tan \theta_v}$; $\theta_m = \arccos(\xi_1^{\frac{1}{\alpha_p+2}})$.

3) Распределение GGX

$$D(\mathbf{m}) = \frac{\alpha_g^2 \chi^+(\mathbf{m} \cdot \mathbf{n})}{\pi \cos^4 \theta_m (\alpha_g^2 + \tan^2 \theta_m)^2}$$

где α_g – параметр шероховатости для распр. GGX;

$$G_1(\mathbf{v}, \mathbf{m}) = \chi^+ \left(\frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{m}}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}} \right) \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \alpha_g^2 \tan^2 \theta_v}}$$

$$\theta_m = \arctan \left(\frac{\alpha_g \sqrt{\xi_1}}{\sqrt{1 - \xi_1}} \right)$$

Замечание. Все описываемые далее материалы поверхностей имеют похожую на вышеописанную структуру: в них так же используются функции f_s – BSDF, f_r – BRDF, f_t – BTDF, а также функции D , F и G и различается только их реализация. Поэтому следующие модели будут описаны коротко с ссылками на литературу.

2. Disney's principled, layered BRDF

Данный материал основан на разработке компании Disney, которая искала оптимальный способ физически-корректно симулировать практически любую поверхность, сохраняя простоту в использовании [32].

Principled BRDF основан на 5 принципах:

- 1) Следует использовать интуитивные понятные, а не физические параметры.
- 2) Должно использоваться как можно меньше параметров.
- 3) Параметры должны варьироваться в диапазоне от нуля до единицы.
- 4) Параметры должны позволять выходить из диапазона, обеспечивающего реалистичность, там, где это имеет смысл.
- 5) Любые комбинации параметров должны также давать максимально реалистичный результат. Сложные материалы – это смеси более простых, например, диффузных, диэлектрических, металлических, прозрачных покрытий и т. д. С помощью параметров, которые регулирует пользователь, можно получить большое количество уникальных материалов.

В качестве диффузной модели используется [20]:

$$f_r = \frac{c}{\pi} (1 + (F_{D90} - 1)(1 - \cos \theta_r)^5)(1 + (F_{D90} - 1)(1 - \cos \theta_i)^5)$$

где c – альбедо;

θ_r - угол между нормалью \mathbf{n} и вектором \mathbf{r} , направленным в камеру;

θ_i – угол между нормалью \mathbf{n} и вектором \mathbf{i} , направленным на источник света;

$F_{D90} = \frac{1}{2} + 2 (\cos \theta_d)^2 \cdot \alpha$, где

θ_d – это угол между векторам i и нормалью микрограницы h ;

α – коэффициент шероховатости.

Для этой модели освещения не выполнен закон сохранения энергии, но это было сознательным решением, направленным на удобство художников.

В число его параметров входит:

- 1) Surface Color – цвет поверхности, обычно поставляемый текстурными картами;
- 2) Subsurface Amount – управляет диффузной формой с использованием подповерхностного приближения;
- 3) Specular Amount – степень гладкости поверхности;
- 4) Specular Roughness – кажущаяся шероховатость поверхности, влияет на зеркальные блики;
- 5) Specular Tint – количество оттенков зеркальных бликов. Значение 0 соотв. существованию ахроматических бликов, и значение 1.0 – сохраняет цвет поверхности;
- 6) Metallicness – металлическое состояние (0 – диэлектрик, 1 – металл). Это линейная смесь между двумя различными моделями. Металлическая поверхность, как об этом говорилось ранее, не имеет диффузного компонента, так как весь преломленный свет затухает. Остается только зеркально-отраженный свет;
- 7) Anisotropy Amount – величина анизотропии поверхности, влияющая на зеркальные блики: при значении 0.0 создает изотропные блики, а при значении 1.0 – полностью анизотропные блики;
- 8) Anisotropy Angle – угол поворота анизотропных бликов. Отображает значения из диапазона $[0,1]$ в диапазон $[0,360]$.

Здесь описаны только некоторые из них, задействованные в материалах сравниваемых моделей. Данная функция реализована в шейдере `asDisneyMaterial`. Она основана на курсе лекций и соответствующих статьях, представленных на конференции ACM SIGGRAPH 2012. [11]

3. Physically-based metal BRDF

Свет, отражающийся от металлических поверхностей, описывается уравнениями Френеля, которые управляются комплексным показателем преломления $\eta = n + ik$. Вместе n и k определяют две характеристики кривой Френеля для материала: отражательную способность материала при прямом просмотре поверхности, когда нормаль направлена в камеру и скорость перехода к зеркальному отражению света в зависимости от угла просмотра. Однако, поскольку обе эти характеристики зависят от обоих параметров n и k , это затрудняет настройку материала. В статье [12] описан и реализован метод переназначения аппроксимированных уравнений Френеля для

неполяризованных волн с параметрами n и k на более интуитивные параметры r и g , которые характеризуют цвет поверхности при прямом падении лучей и при косвенном соответственно.

Данная функция реализована в шейдере `as_Metal`, где параметр r называется Face Reflectance, а g – Edge Reflectance. Оба принимают значения в диапазоне от 0 до 1. Также у шейдера важно отметить параметр `roughness`, который определяет шероховатость поверхности. При низком значении, например, 0.001 получается идеальное отражение, т.е. зеркальная поверхность.

4. Шейдер `asStandardSurface`

В данном шейдере поддерживается большое количество разных параметров:

- 1) Diffuse Parameters – диффузные свойства поверхности реализуются с помощью модели Орена-Наяра [14]. Такая же модель используется в `Cycles` в шейдере Diffuse BSDF;
- 2) Subsurface Parameters – свойства подповерхностного рассеивания реализуются с помощью BSSRDF (двунаправленная функция распределения отражательной способности поверхности рассеяния) [15];
- 3) Specular Parameters – регулирование отражательных свойств поверхности [3];
- 4) Refraction Parameters – параметры, контролирующие преломленные лучи [3];
- 5) Incandescence Parameters – параметры, позволяющие сделать материал источником света;
- 6) Transparency Parameters – параметр альфа канала, отвечает за видимость объекта;
- 7) Bump Parameters – параметр тонкой настройки микронормалей поверхности. Позволяет подключить карту нормалей.

Здесь приведены некоторые основные параметры, которые использовались в исследовании. Все далее описываемые материалы имеют похожую структуру, поэтому в них будут описаны только существенные различия и список принимаемых параметров. Все шейдеры `appleseed` реализованы на языке OSL и доступны по ссылке [13].

В рендере `Cycles`:

1. Diffuse BSDF

Данная модель [16] использует диффузную модель отражения Ламберта (англ. Lambertian) и Орен-Наяра (англ. Oren-Nayar) [14]:

$$L_r(\theta_r, \theta_i, \phi_r, \phi_i, \sigma) = \frac{c}{\pi} (A + B \max[0, \cos(\phi_r + \phi_i)] \sin \alpha \tan \beta)$$

где $A = 1.0 - 0.5 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.33}$;

$B = 0.45 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.09}$;

θ_r, ϕ_r – углы сферической системы координат вектора, направленного в сторону камеры;

θ_i, ϕ_i – углы сферической системы координат вектора, направленного в сторону источника света;

$\alpha = \max[\theta_r, \theta_i]$;

$\beta = \min[\theta_r, \theta_i]$;

c – альбедо, σ – коэффициент шероховатости;

При $\sigma = 0$, уравнение сводится к модели Ламберта: $L_r = \frac{c}{\pi}$.

В Cycles реализован шейдер Diffuse BSDF с параметрами:

1) Color – вектор RGB;

2) Roughness – коэффициент шероховатости σ .

Также в качестве коэффициента Френеля здесь используется приближение Шлика [19]:

$$F(\theta) = F(0) + (1 - F(0))(1 - \cos \theta)^5,$$

где θ – угол падающей волны относительно нормали, $F(0)$ – отражение при нормальном падении.

2. Emission

Шейдер используется для добавления освещения. Материал становится источником освещения [17].

В качестве параметров принимает:

1) Color – цвет источника;

2) Strength – сила источника света в Ваттах.

3. Glossy BSDF

Данный шейдер реализует отражающую свет поверхность, используя модель функции BRDF Кука-Торренса [18, 21].

Нужную функцию распределения нормалей D можно выбрать из:

1) Sharp – идеальное отражение, шероховатость никак не учитывается;

2) GGX;

3) Beckmann;

4) Ashikhmin-Shirley.

В исследовании использовались модели GGX и Beckmann, которые были описаны ранее. Подробное описание всех моделей функции распределения можно найти в [20].

4. Glass BSDF

Данная модель оптимизирована для моделирования стеклянных поверхностей [22]. В ней используется BRDF Кука-Торренса [17] и есть возможность, так же как в предыдущем шейдере, выбрать используемое распределение для микрограней поверхности, чтобы регулировать степень шероховатости стекла:

- 1) Sharp;
- 2) GGX;
- 3) Beckmann.

Также через параметры задаются:

- 1) Color – цвет стекла;
- 2) Roughness – шероховатость, задается с помощью D;
- 3) IOR (Index of refraction) – показатель преломления.

5. Principled BSDF

Аналог asDisneyMaterial [33]. В данном шейдере соблюдаются те же принципы и присутствуют те же параметры, что и в оригинальной статье [11, 23].

6. Refraction BSDF

Данный шейдер заставляет материал пропускать преломленные лучи [24].

В нем так же можно выбрать модель распределения:

- 1) Sharp;
- 2) Beckman;
- 3) GGX.

7. Transparent BSDF

Альфа-канал материала [25]. Заставляет поверхность «растворяться», пропуская преломленные лучи, никак не влияя на их траекторию.

В рендере **LuxCore**:

1. Glass Material

Стеклянная поверхность [26]. Параметры:

- 1) IOR (Index of refraction) – показатель преломления;
- 2) Reflection Color – цвет отраженных лучей;
- 3) Transmission Color – цвет преломленных лучей.

2. **Matte Material**

Матовая поверхность, равномерно рассеивающая свет [27].

Параметры:

- 1) Diffuse Color – цвет поверхности;
- 2) Sigma – шероховатость.

3. **Matte Translucent Material**

Матовая поверхность, учитывающая подповерхностное рассеивание [28].

Параметры:

- 1) Reflection Color – цвет поверхности;
- 2) Transmission Color – равномерный цвет преломленного света, проходящего через материал;
- 3) Sigma – шероховатость.

4. **Mirror Material**

Идеальная зеркально отражающая поверхность [29].

Параметры:

- Reflection Color – цвет зеркала. Позволяет изменять цвет отраженных лучей, направленных в камеру.

5. **Disney Material**

Аналог шейдера asDisneyMaterial [33] и Principled BSDF [23, 11].

6. **Glossy Material**

Глянцевый материал [30]. Параметры:

- Diffuse Color – диффузная компонента;
- Specular Color and IOR – зеркальная компонента;
- Roughness – шероховатость;
- Absorption Color / Depth – цвет и глубина поглощения преломленных лучей;
- Multibounce – мягкое рассеивание света на поверхности, имитирующее ткань или кожу.

7. **Glossy Translucent Material**

Материал, смешивающий в себе диффузную, зеркальную компоненты и подповерхностное рассеивание [31].

Параметры такие же, как и у предыдущего за добавлением:

- Transmission Color – равномерный цвет преломленного света, проходящего через материал.

8. Metal Material

Общая металлическая поверхность [32]. Параметры:

- Color/Fresnel Texture – цвет металла;
- Roughness – шероховатость.

Цифровое изображение представляется в виде набора пикселей, выровненных по прямоугольной сетке. Для того чтобы вычислить дискретные значения пикселей в цифровом изображении, необходимо взять за образец исходную непрерывно определяемую функцию изображения. В PBR единственный способ получить информацию о функции изображения – это взять ее образец с помощью трассировки лучей. Изображение может быть создано только путем выборки значений функции изображения, которой является уравнение рендеринга, в конкретных позициях пикселей. Другими словами, это уравнение определяет цвет пикселя на изображении. Чем больше выборок для разных пикселей, тем лучше качество. Для решения этого уравнения существует множество подходов, однако наибольшую популярность получили методы Монте-Карло для численного решения интегралов. Рассмотрим алгоритмы, основанные на этом методе, реализованные в рендерах и используемые в исследовании.

Глава 1.3 Рендеры и алгоритмы трассировки

Алгоритм Path Tracing

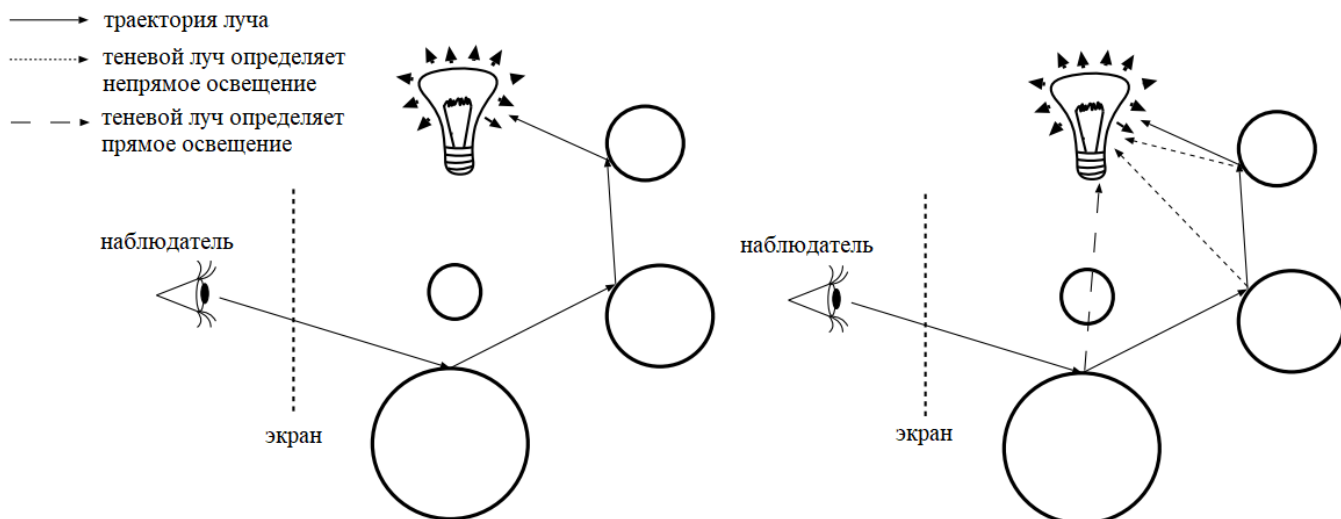


Рис. 2 Схема алгоритма трассировки пути без(слева) и с(справа) вычислением глобального освещения. [34]

Алгоритм трассировки пути был предложен Джеймсом Т. Каджия в той же работе, в которой было описано уравнение рендеринга [4]. Он заключается в симуляции пути светового луча для каждого пикселя в изображении: когда луч пересекается с поверхностью, в псевдослучайном направлении выпускается отраженный луч и в обратном направлении теневой луч. Трассировка пути причисляется к Gathering type алгоритмам, которые начинают из положения камеры и «собирают» излучение посещенных точек.

- 1) Из точки на экране выпускается луч и далее ищется пересечение его с каким-либо объектом.
- 2) Если пересечений нет, то возвращаем свет окружения, другими словами, фон. Если пересечение произошло, то определяем альбедо объекта с как сумму его собственного излучения + прямое освещение источник света.
- 3) Функция **BRDFSampling** находит новое направление **newray**, используя различные оптимизационные методы, описанные далее. В частности, метод русской рулетки, позволяющий пропускать рекурсивный запуск **Trace(newray)**;
- 4) Рекурсивный вызов строит новый луч и возвращает энергетическую яркость объекта, с которым пересекся отраженный луч. Таким образом в данной строке происходит учет (сбор) влияния отражений луча от других объектов.

Псевдокод алгоритма в приложении А, п. 1.

Алгоритм Stochastic Progressive Photon Mapping

SPPM (Stochastic Progressive Photon Mapping) – это модификация PPM (Progressive Photon Mapping), который, в свою очередь является модификацией Photon mapping. Рассмотрим по порядку каждый из них.

Метод фотонных карт (photon mapping) [5, 34] – двухэтапный алгоритм.

На первом этапе из источника света выпускаются фотоны – набор данных вида (p_i, ω_i, β_i) , где p_i – вершины – точки на поверхности сцены, от которых он отражался; ω_i – вектор направления из источника освещения в точку p_i ;

β_i – вес пропускной способности – характеристика, которая показывает сколько энергии остается у фотона после поглощения некоторого количества энергии в результате столкновения с поверхностью. Зависит от BSDF поверхности, энергетической яркости L_e и функции геометрии G.

Каждый такой набор сохраняется в кэше, и вся их совокупность называется фотонной картой.

С этим этапом связана проблема ограниченности памяти кэша: когда большую точность визуализации невозможно достичь, так как требуется больше фотонов, чем доступно памяти под их хранение.

Далее следует промежуточный оптимизационный этап построения kd-дерева, которое понадобится в дальнейшем для нахождения k ближайших «освещенных» точек.

На втором этапе лучи выпускаются из камеры в обратном направлении по путям лучей, которые достигли камеры на первом этапе. В каждой вершине p_i в окрестности некоторого радиуса, который задается как параметр, ищутся соседние фотоны для оценки непрямого освещения.

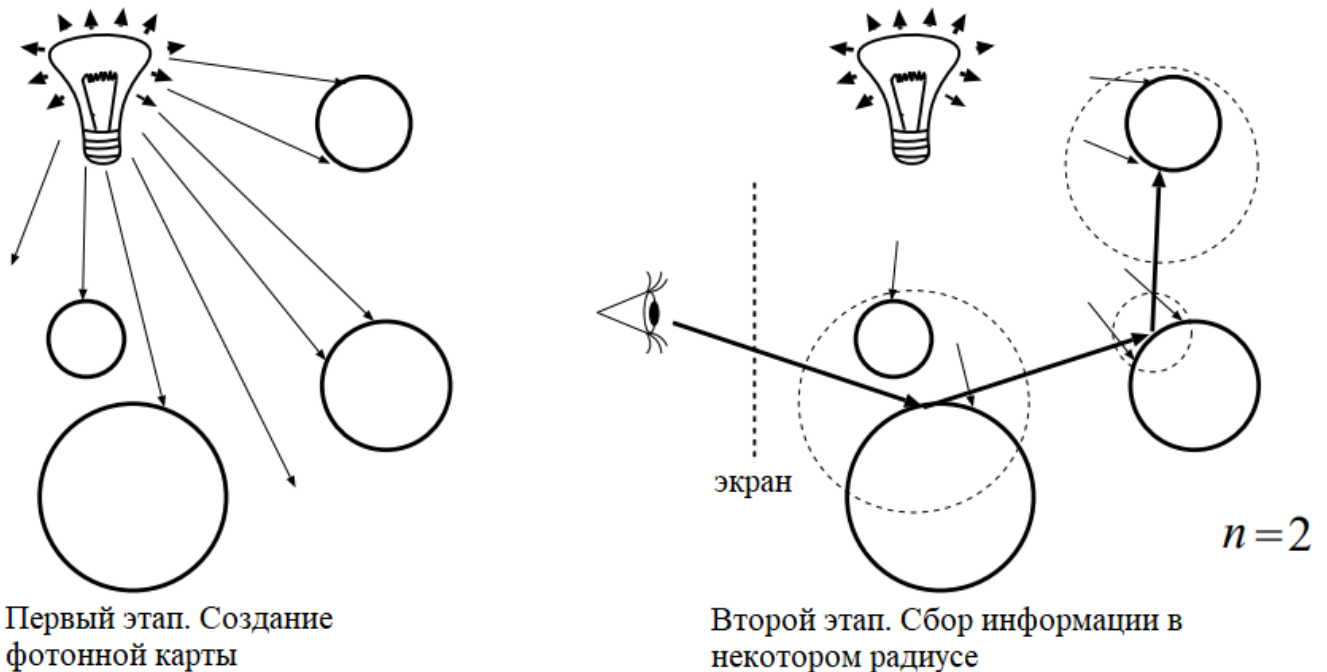


Рис. 3 Схема этапов метода фотонных карт. [34]

Прогрессивный метод фотонных карт (Progressive Photon Mapping) [5] – реструктуризация метода фотонных карт. Теперь на первом этапе испускаются лучи из каждого пикселя камеры. И для тех лучей, что достигают диффузную поверхность, либо напрямую, либо отражаясь или преломляясь при столкновении отражающей или прозрачной средой, в кэше сохраняется соответствующим набором информации о них: геометрическая информация о поверхности, диффузный цвет, учет влияния на эти данные другой поверхности (в случае прохождения через неё) и т.д. Этот массив называется видимыми точками (англ. *visible points*).

Далее, на втором этапе, фотоны испускаются из источника освещения и каждый из них при столкновении с поверхностью вносит свой вклад в энергетическую яркость ближайших видимых точек. Причем прямое освещение можно рассчитать обычными алгоритмами, например, трассировкой пути. Для преломленных лучей перед этим необходимо проследить путь до следующей вершины p_i .

*В данном способе также есть проблема памяти, которая связана с ограниченностью хранилища видимых точек. Поэтому для изображений с высоким разрешением или для тех, что требуют большого количества проходов, например, при создании эффекта размытости (англ. *blur*) или при большой глубине резкости, память все еще может быть ограничением.*

Стохастический прогрессивный метод фотонных карт (Stochastic Progressive Photon Mapping) – модификация PPM – не имеет никаких ограничений по памяти. Алгоритм итеративно повторяет этапы PPM. На первом этапе, так же, как и в PPM, лучи испускаются из камеры, но по более упрощенной модели, экономящей память (например, испускается только один луч для каждого пикселя). Далее повторение второго этапа PPM. После этого видимые точки сбрасываются и создается новый массив с другим набором данных, процесс повторяется.

Также постепенно с увеличением количества проходов и, тем самым, увеличением кол-ва фотонов, содержащих информацию о точке поверхности, уменьшается окрестность поиска фотонов. Уменьшая радиус, мы гарантируем, что фотоны, которые будут использоваться, будут ближе к точке и, таким образом, будут способствовать более точной оценке распределения падающего излучения.

Псевдокод алгоритма в приложении А, п. 2.

Алгоритм Bidirectional path-tracing (BDPT)

BDPT сначала последовательно строит путь начиная с точки p_0 на камере. Следующая вершина, p_1 , находится путем вычисления первого пересечения вдоль луча камеры. Другая вершина находится путем семплирования BSDF в точке p_1 и трассировки луча, чтобы найти точку p_2 , и так далее. Результирующий путь из t вершин: p_0, \dots, p_{t-1} .

Аналогично, начиная с точки на источнике света q_0 (используя соответствующие характеристики поверхности (BSDF) в каждой вершине), создается световой подпуть из s вершин: q_0, \dots, q_{s-1} .

Полный путь есть соединение вершин подпутей: $P = q_0, \dots, q_{x-1}, p_{y-1}, \dots, p_0$, где $x \leq s$ и $y \leq t$. [5]

Можно выделить три способа улучшения алгоритма:

- 1) Подпути могут быть использованы повторно. Если задан путь P , то соединяя всевозможными способами различные комбинации префиксов $q_i, 1 < i < s$ и $p_j, 1 < j < t$, можно построить множество уникальных путей длины $2 < l < s+t$.
- 2) Нельзя пытаться соединять пути, использующие только одну вершину, относящуюся к одному из подпутей. Предпочтительнее построить такие пути с применением оптимизированных функций дискретизации, предоставляемых камерой и источниками света; для источников света, например, таковыми являются техники прямого освещения.
- 3) Можно оценивать различные стратегии для генерации путей определенной длины, потому что очевидно, что некоторые стратегии, которые хороши для создания одних видов траекторий, могут быть плохи для других.

Множественная выборка по важности (англ. Multiple importance sampling) может быть применена для оценивания стратегий и использования их там, где они лучше всего подходят. Это применение MIS имеет решающее значение для эффективности BDPT.

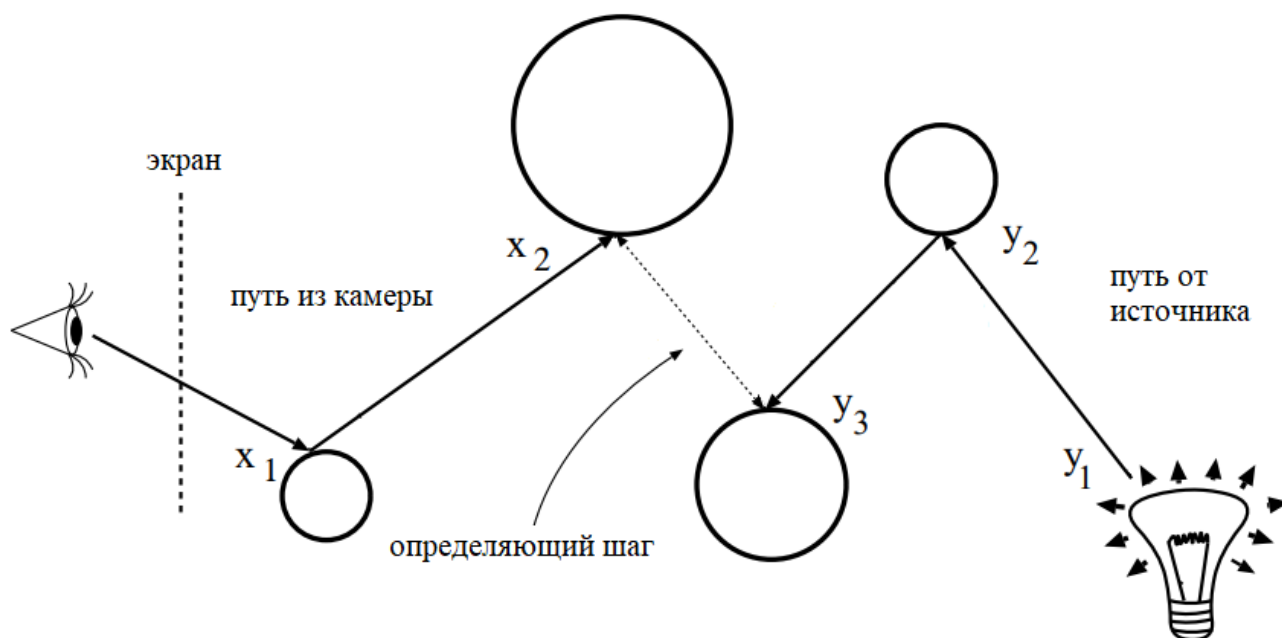


Рис. 4 Схема алгоритма двунаправленной трассировки пути с единичным детерминированным шагом [34].

Оптимизационные методы

Для каждого алгоритма существуют способы ускорить его работу. Общая идея состоит в том, чтобы выбрать те лучи, которые вносят наибольший вклад в изображение. Рассмотрим некоторые основные способы, которые упоминались выше.

Tile size

Для растеризации большеразмерного изображения оно подразделяется на более мелкие, так называемые плитки (англ. tiles). Размер плитки задается с помощью двух параметров x и y . Для наилучшей скорости рендеринга необходимо выбирать $x = y = 16, 32, 64, \dots$. Для рендеринга на CPU лучше всего подходят небольшие размеры, например, 16×16 и 32×32 [41]. В данной работе во всех экспериментах использовался размер сетки 32×32 .

Metropolis Sampling

Это техника получения набора выборок для известной неотрицательной функции $f(x) | f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$. После определения первого случайного значения $X_0 \in \mathbb{R}^n$, X_i выбирается с помощью случайной мутации x' , для которой определены условия. Если они выполняются, то $X_i = x'$, иначе $X_i = X_{i-1}$. Она была описана в статье [39].

Выборка по важности (англ. Importance sampling)

Отражение лучей в полностью случайном направлении может привести к большим и нецелесообразным затратам, поэтому имеет смысл выбирать направление в зависимости от возвращаемого значения функции BRDF. Если оно близко к нулю, то скорее всего такой луч не принесет в сцену заметных изменений. И наоборот, в направления, которые приводят к большим значениям BRDF, следует выпускать больше лучей.

Приближение Монте-Карло (Monte-Carlo estimator) – аппроксимация уравнения рендеринга:

$$F_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f(X_i)}{p(X_i)}$$

где $X_i \in [0, 1]$ – сл. величины, распределенные в соответствии с плотностью $p(x)$;

$p(x)$ – функция плотности вероятности (англ. Probability density function);

Причем должно выполняться $\forall x: |f(x)| > 0 \Rightarrow p(x) \neq 0$;

N количество случайных величин X_i ;

$f(x)$ – подынтегральное выражение [5].

Выборка по важности – метод уменьшения дисперсии, которая позволяет оценке сходиться быстрее путем контролирования PDF (англ. probability density function, рус. функция плотности вероятности), а значит и выбираемых X_i . Чем больше $p(x)$

похожа на $f(x)$, тем точнее оценка.

Множественная выборка по важности (англ. Multiple importance sampling)

Применяется для уменьшения дисперсии интегралов вида $\int f(x)g(x)dx$.

Целью является получение хотя бы одной функции плотности вероятности, которая будет похожа на форму подынтегральной функции [5].

Пусть есть PDF p_f и p_g функций $f(x)$ и $g(x)$ соответственно. Тогда новое приближение Монте-Карло имеет вид:

$$\frac{1}{n_f} \sum_{i=1}^{n_f} \frac{f(X_i)g(X_i)\omega_f(X_i)}{p_f(X_i)} + \frac{1}{n_g} \sum_{j=1}^{n_g} \frac{f(Y_j)g(Y_j)\omega_g(Y_j)}{p_g(Y_j)}$$

где n_f – количество случайных величин, распределенных в соответствии с плотностью p_f ;

n_g – кол-во случайных величин, распределенных в соответствии с плотностью p_g ;

ω_f, ω_g – весовые функции, которые должны подбираться так, чтобы мат. ожидание данной оценки равнялось подынтегральной функции $f(x)g(x)$, а также учитывать всевозможные способы выбора сл. вл. X_i и Y_j .

Примером такой функции может быть так называемая балансировочная эвристика (англ. the balance heuristic) [35]:

$$\omega_k(x) = \frac{n_k p_k(x)}{\sum_i n_i p_i(x)}$$

Русская рулетка и расщепление (англ. Russian roulette and Splitting)

Это два связанных метода, призванных улучшить сходимость метода Монте-Карло за счет повышения вероятности того, что каждая выборка внесет существенный вклад в результат [5].

Русская рулетка позволяет пропускать вычисления, которые заведомо не принесут или привнесут, но очень мало результата. Например, если в уравнении рендеринга для некоторого множества направлений ω_i значение функции $f_s(p, \omega_o, \omega_i)$ близко или равно 0, то, очевидно, отслеживание этого луча не имеет смысла и его необходимо пропустить. Также русская рулетка позволяет не учитывать значения, которые падают при очень маленьком угле относительно горизонта ($|\cos \theta| = 0 + \varepsilon$).

Расщепление – метод, который распределяет количество пущенных лучей в зависимости от вклада, который эти лучи могут привнести. Например, если для приближения интеграла взято 100 случайных величин, то необходимо проследить траекторию преломленных и отраженных в направлении камеры лучей. Используя

обычный метод, алгоритм просчитывал бы 200 лучей в целом. Но 100 отраженных лучей – это избыток.

С помощью расщепления приближение для такого случая можно заменить на следующее:

$$F_{NM} = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{L(x_i, y_i, \omega_{i,j})}{p(x_i, y_i)p(\omega_{i,j})}$$

где $\omega_{i,j}$ – направление на источник света;

(x_i, y_i) – координаты пикселя на изображении.

В исследуемых рендерах реализованы следующие алгоритмы:

1. appleseed

Алгоритм Path Tracing и SPPM.

Для просчета прямого освещения можно выбрать способ просчета:

- с помощью Path Tracing;
- с помощью SPPM;
- без просчета.

В алгоритме трассировки пути есть возможность выбрать способ итерирования:

- По умолчанию – количество итераций задается пользователем;
- Адаптивный семплинг – количество итераций задается пользователем. Также задается минимальный уровень шума, при котором определяется количество дополнительных семплов для определенного пикселя, минимальное и максимальное количество которых также задается пользователем.

В исследовании использовалась версия 2.2

2. Cycles

Алгоритм Path Tracing;

А также Branched path tracing, для которого можно указать точное количество отражений лучей от определенного типа поверхности.

В исследовании использовалась версия Blender 2.82.

3. LuxCore

Алгоритм Path Tracing и Bidirectional path-tracing.

Также в этом рендере есть технология PhotonGI cache [36], которая включает в себя 3 функции:

- Direct light cache – кеш прямого освещения;
- Indirect light cache – кеш непрямого освещения;

- Caustic light cache – кеш каустик.

Данная технология основана на методе фотонных карт [34]. В комбинации с Path tracing данный алгоритм хорошо подходит для просчета сложного освещения. В исследовании использовалась версия 2.4.

Глава 1.4 Способ сравнения качества изображений

Качество изображения оценивается с помощью объективного full-reference (FR) метода, в основе которого лежит сравнение с эталонным изображением, имеющим идеальное качество. Объективный метод подразумевает использование алгоритма, анализирующего различные атрибуты изображения.

В настоящей работе для сравнения изображений используется метрика PSNR (англ. peak signal-to-noise ratio) – пиковое отношение сигнала к шуму. [37] Данная метрика используется в основном для определения схожести между зашумленным и чистым изображением. Чем больше возвращаемое значение функции, тем больше схожесть. PSNR определяется с помощью среднеквадратической ошибки (англ. mean squared error):

$$MSE = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} |I(i, j) - I_{hat}(i, j)|^2$$

где I и I_{hat} изображения размера $m \times n$, последнее из которых считается зашумленным приближением другого.

Для цветных изображений с тремя цветовыми каналами (RGB) MSE – это сумма всех квадратов разностей значений, разделенная на размер изображения и на 3. Кроме того, для цветных изображений изображение преобразуется в другой цветовой формат – YCbCr, и PSNR применяется к каждому каналу.

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right)$$

где MAX_I – максимальное значение яркости пикселя изображения.

В данной работе используется функция модуля `skimage.metrics` языка Python: `peak_signal_noise_ratio(image_true, image_test, data_range=None)`[38].

Нормирование яркости

Гистограмма изображения – дискретная функция F , определенная на множестве $\Omega = [0, 2^b]$, b – количество бит, кодирующих яркость одного пикселя. Большое количество ненулевых значений, сконцентрированных в области нулевых (или,

наоборот, ненулевых) значений яркости говорит о том, что изображение слишком темное (яркое) и не удобно для восприятия человеческим глазом. Выравнивание гистограммы в соответствии равномерном распределению называется нормировкой яркости изображения.

Нормировка яркости с помощью выравнивания гистограмм делает результат инвариантным, во-первых, к уровню яркости полученных экспериментальных изображений в методе прорисовки, во-вторых, к гамма-преобразованию во всех цветовых каналах.

Для цветных изображений для корректной нормировки необходимо перевести RGB изображение в другое цветовое пространство. В данном исследовании используется пространство YCrCb. В этом пространстве Y представляет собой компоненту яркости [42]. Для конвертирования используется реализованная в модуле cv2 языка Python функция `cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2YCR_CB)`.

Выравнивание гистограммы производится с помощью функции, реализованной в том же модуле: `cv2.equalizeHist(Y_channel, newY_channel)`.

Полный код в Приложении А, п. 3

Для исследования распараллеливания в первых двух экспериментах алгоритм поочерёдно запускался на 6 и 12 поток.

Эксперименты

Все эксперименты проводились на CPU AMD Ryzen 5 3600 3.60 ГГц.
Операционная система Windows 10.

Эксперимент 1. Стекло́нный стака́н

В данном эксперименте исследовалась возможность алгоритма рассчитывать каустики. На белой рассеивающей плоскости расположена модель стакана, для которого используется материал стекла. Тип освещения – прожектор.

Разрешение изображения: 1920x1080. [приложение В, Рис. 1]

1. В appleseed используется алгоритм SPPM

для обсчета прямого освещения используется SPPM

количество испускаемых лучей из источника: 10М;

радиус окрестности: 0.1;

начальное количество отскоков возможных отражений до ограничения семплирования с помощью русской рулетки: 6.

количество итераций (семплов): 25, 52, 156, 370.

2. Cycles

Используется алгоритм Path Tracing.

максимальное количество отражений/преломлений лучей (за 1 итерацию) испускаемых от камеры от:

- Диффузной поверхности – 4;
- Глянцевой поверхности – 50;
- Пропускающей поверхности – 40;

количество итераций (семплов): 17, 32, 89, 195.

3. В LuxCore

Используется алгоритм Path Tracing + Caustic light cache;

количество испускаемых лучей из источника: 10М;

радиус окрестности: 0.01;

Максимальное количество отражений фотона, выпущенных из источника света: 16;

Максимальное количество отражений лучей, испускаемых от камеры от:

- Диффузной поверхности – 16;
- Глянцевой – 36;
- Зеркальной – 38;

количество итераций (семплов): 148, 292, 854, 1898.

Эксперимент 2. Стекло́нные модели бутылок и зеркало

В данном эксперименте нет сложных моделей освещения, исследуется способность рендеров реалистично отрисовывать пропускающую поверхность

стекла, отражающую зеркальную поверхность и рассеивающую диффузную поверхность.

Разрешение изображения: 2000x1700 рх. [приложение В, Рис. 2]

1. appleseed

максимальное количество отражений/преломлений испускаемых лучей:

диффузной поверхности – 8;

глянцевой поверхности – 8;

пропускающей поверхности – 8;

количество итераций (сэмплров): 7, 14, 27, 54.

2. Cycles

Максимальное количество отражений/преломлений испускаемых лучей:

диффузной поверхности – 16;

глянцевой поверхности – 6;

пропускающей поверхности – 8;

количество итераций (сэмплров): 36, 72, 139, 280.

3. LuxCore

Максимальное количество отражений/преломлений испускаемых лучей:

диффузной поверхности – 4;

глянцевой(отражающей) поверхности – 12;

пропускающей поверхности – 12;

Количество итераций на (сэмплров): 88, 173, 335, 676.

Эксперимент 3. Полупрозрачная штора

В данном эксперименте исследуется способность рендеров имитировать пропускающую свет ткань.

Разрешение изображения: 1120x1540 рх. [приложение В, Рис. 3]

1. appleseed

Используется алгоритм трассировки пути с двумя проходами для оценки прямого освещения. Просчет каустиков отключен.

Максимальное количество отражений/преломлений испускаемых лучей – 10;

диффузной поверхности – 10;

глянцевой поверхности – 8;

пропускающей поверхности – 8;

количество шагов адаптивного семплера: 5, 10, 20, 40.

Параметры адаптивного семплера заданы по умолчанию.

2. Cycles

Используется алгоритм трассировки пути

Максимальное количество отражений/преломлений испускаемых лучей – 16;

диффузной поверхности – 14;

глянцевой поверхности – 4;
пропускающей поверхности – 16;
прозрачной поверхности – 16.

количество итераций на (семплов): 1333, 2624, 5172, 10486.

3. LuxCore

Для данного эксперимента было получено два набора экспериментов алгоритмами Path tracing и Bidirectional Path tracing.

В алгоритме *Path tracing*:

Максимальное количество отражений/преломлений испускаемых лучей – 16;
диффузной поверхности – 16;
глянцевой поверхности – 4;
пропускающей поверхности – 6;
количество итераций на (семплов): 1058, 2084, 4106, 8326.

В алгоритме *Bidirectional Path tracing*:

Максимальное количество отражений луча:

- Выпущенного из камеры – 12;
- Выпущенного из источника света – 16.

Также используется оптимизационный алгоритм семплирования Metropolis.

- Процент мутации – 40%;
- Максимальное количество мутаций одного луча – 512.

Количество итераций (семплов): 401, 789, 1556, 3145.

Эксперимент 4. Модель световода

В данном эксперименте представлена модель освещения, когда источник света находится вне области видимости камеры. Исследуется способность алгоритмов корректно отрисовывать данную сложную модель. Свет направлен в стеклянную трубу с индексом преломления 1.9. 3D модель сцены можно увидеть на [приложение В, Рис. 4]. Разрешение изображения: 1600x900 px. [приложение В, Рис. 5]

1. В appleseed используется алгоритм SPPM

Для обсчета прямого освещения используется SPPM.

количество испускаемых лучей из источника: 1М;

радиус окрестности: 0.1;

начальное количество отскоков возможных отражений до ограничения семплирования с помощью русской рулетки: 12.

Количество итераций (семплов): 177, 354, 707, 1413.

2. Cycles

Используется алгоритм Branched Path Tracing.

Максимальное количество отражений/преломлений лучей (за 1 итерацию) испускаемых от камеры от:

диффузной поверхности – 64;

глянцевой поверхности – 50;

пропускающей поверхности – 50;

количество итераций (семплов): 40, 80, 160, 320.

3. LuxCore

Используется алгоритм Bidirectional Path-tracing.

Максимальное количество отражений луча:

- Выпущенного из камеры – 16,

- Выпущенного из источника света – 16.

Также используется оптимизационный алгоритм семплирования Metropolis.

- Процент мутации – 20%;

- Максимальное количество мутаций одного луча – 512.

Количество итераций (семплов): 599, 1198, 3058, 6114.

Эксперимент 5. Модель бассейна.

В данном эксперименте исследуется способность рендеров корректно имитировать поверхность воды. В сцене есть два материала являющимися источниками освещения, то есть также исследуется способность рендеров имитировать испускающий свет материал.

Разрешение изображения: 1700x1200 px. [приложение В, Рис. 6]

1. appleseed

Используется алгоритм Path Tracing с двумя проходами для оценки прямого освещения. Просчет каустиков включен.

Максимальное количество отражений/преломлений испускаемых лучей – 10;

диффузной поверхности – 3;

глянцевой поверхности – 10;

пропускающей поверхности – 8;

Количество итераций (семплов): 7, 17, 34, 65.

2. Cycles

Используется алгоритм Branched Path Tracing.

Максимальное количество отражений/преломлений лучей (за 1 итерацию)

испускаемых от камеры от:

диффузной поверхности – 8;

глянцевой поверхности – 14;

пропускающей свет поверхности – 14;

Количество итераций (семплов): 24, 60, 120, 229.

3. LuxCore

Используется алгоритм Bidirectional Path-tracing.

Максимальное количество отражений луча:

- Выпущенного из камеры – 16;
- Выпущенного из источника света – 16.

Также используется оптимизационный алгоритм семплирования Metropolis.

- Процент мутации – 60%;
- Максимальное количество мутаций одного луча – 512.

Количество итераций (семплов): 100, 250, 500, 962.

3 Сравнение рендеров, выводы

Для определения качества распараллеливания проводятся испытания сначала на 6 потоках, потом на 12. Процентное соотношение вычислялось по формуле:

$$t_{\%} = \frac{time_{12}}{time_6} \cdot 100$$

Эксперимент 1

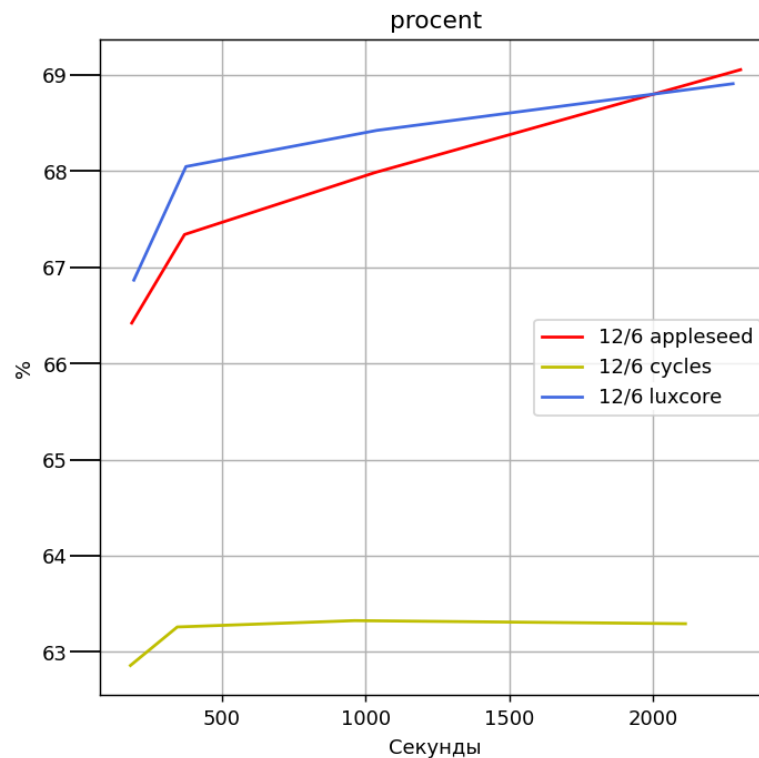


Рис. 1 Процентное соотношение улучшения времени работы для каждого отрезка времени

Из данного на Рис. 1 графика видно, что рендеры appleseed и luxcore улучшают время примерно на 68% для алгоритмов sppm и path tracing + caustic light cache при увеличении кол-ва потоков в 2 раза. Рендер Cycles, который использует path tracing, улучшает скорость на ~63%.

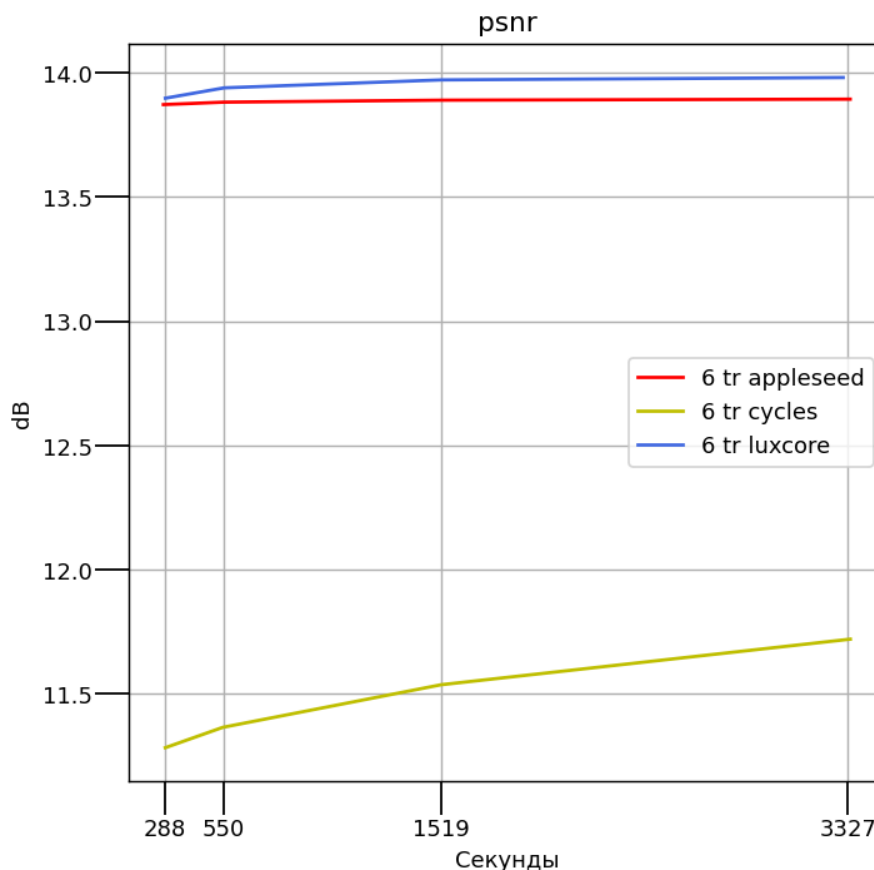


Рис.2 Зависимость качества от времени работы рендеров.
Время при 6 потоках

На рис. 2 видно, что luxcore и appleseed показывают примерно одинаковый результат по схожести с эталонным изображением. Это связано с тем, что в них используются похожие двунаправленные методы, в которых имитируется реальный путь светового луча, учитывая все преломления и отражения. Поэтому они обеспечивают более быстрый и качественный способ расчёта непрямого освещения, такого как каустика. Cycles показывает много более низкий результат за то же время. Это объясняется тем, что собирающий алгоритм Path tracing плохо подходит для отрисовки непрямого освещения. Также важно обратить внимание на сами графики, а именно на изменения psnr в зависимости от времени. Средняя скорость роста качества: у appleseed = 0.00779, у cycles = 0.14529, у luxcore = 0.0328.

Можно заметить, что luxcore и appleseed имеют небольшое изменение psnr относительно времени. Это говорит о том, что данные рендеры достигли своего пика качества, когда последующие итерации не вносят значительного результата в изменение изображения. Из этого можно сделать вывод, что они работают быстрее path tracing в cycles в данном эксперименте. Наиболее высокое качество было достигнуто рендером luxcore.

Эксперимент 2

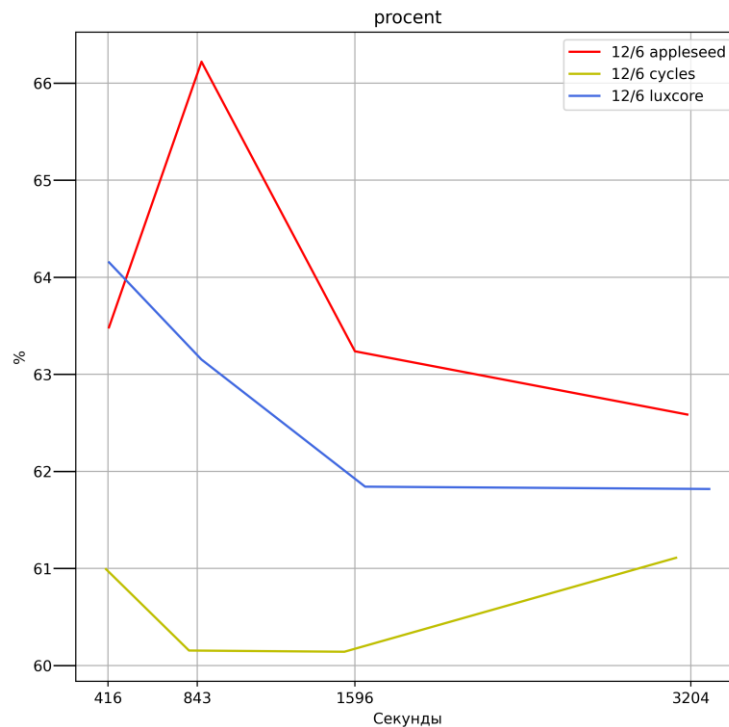


Рис. 3 Процентное соотношение улучшения времени работы для каждого отрезка времени

Для отрисовки данной сцены во всех рендерах использовались алгоритмы трассировки пути. Из данного эксперимента можно сделать аналогичный с прошлым экспериментом вывод – среднее увеличение скорости алгоритма составляет 60 %.

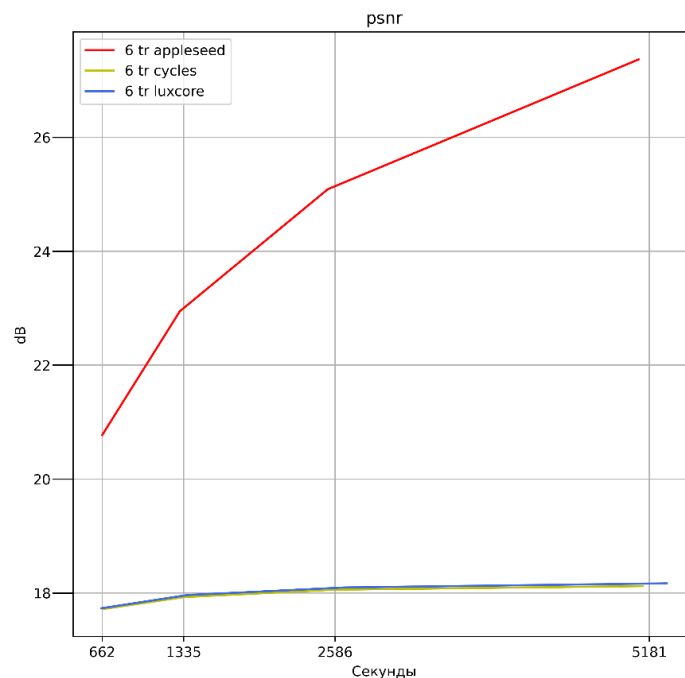


Рис. 4 Зависимость качества от времени работы рендеров.

Время при 6 потоках.

Из рис. 4 видно, что appleseed показывает наибольшую схожесть с эталоном, но следует учесть, что на такой результат влияют:

1. первое, то что полностью идентичный результат в принципе невозможно получить разными рендерами.
2. в качестве эталонного изображения взят результат модели того же appleseed, но за неограниченное время.

Тем не менее, такая реалистичность объясняется более точными математическими моделями поверхностей.

Видно, что примерно одинаковый результат получают рендеры cycles и luxcore. Также важно обратить внимание на скорость роста графиков.

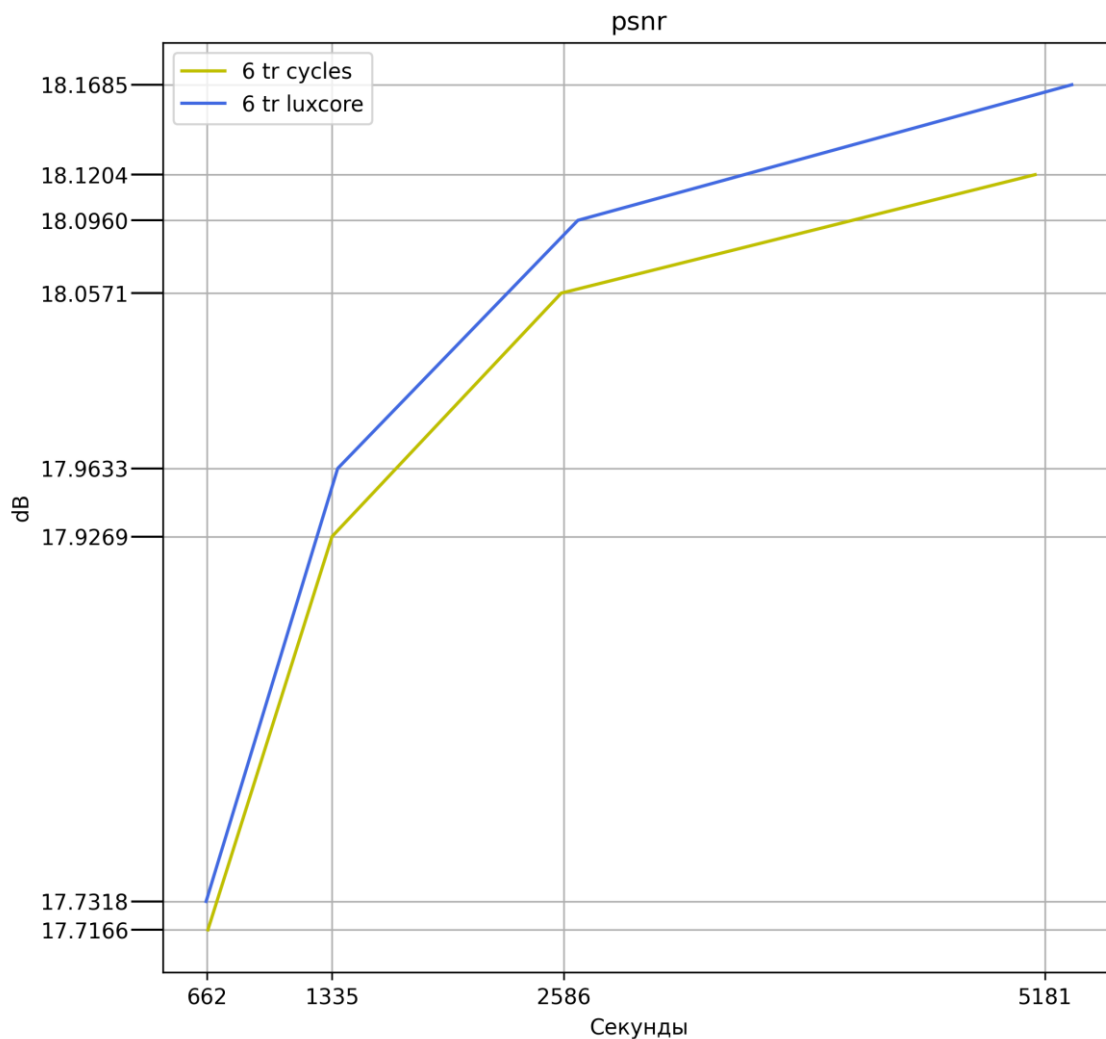


Рис. 5 Зависимость качества от времени работы рендеров luxcore и cycles.
Время при 6 потоках.

Как можно видеть рис. 4, скорость роста у рендеров LuxCore и cycles много меньше, чем у appleseed. В данном случае это говорит о том, что рендеры сходятся к немного к другому изображению, отличному от эталона и из-за этого метрика psnr выдает менее точный результат. На рис. 5 видно, что рендеры Cycles и LuxCore за одинаковый промежуток времени дают близкие по качеству друг к другу результаты. В них используется похожие модели поверхностей. Отсюда можно сделать вывод, что

для данного типа сцен для быстрого результата оптимально выбирать Cycles или LuxCore, а для максимально реалистичного – appleseed.

Эксперимент 3

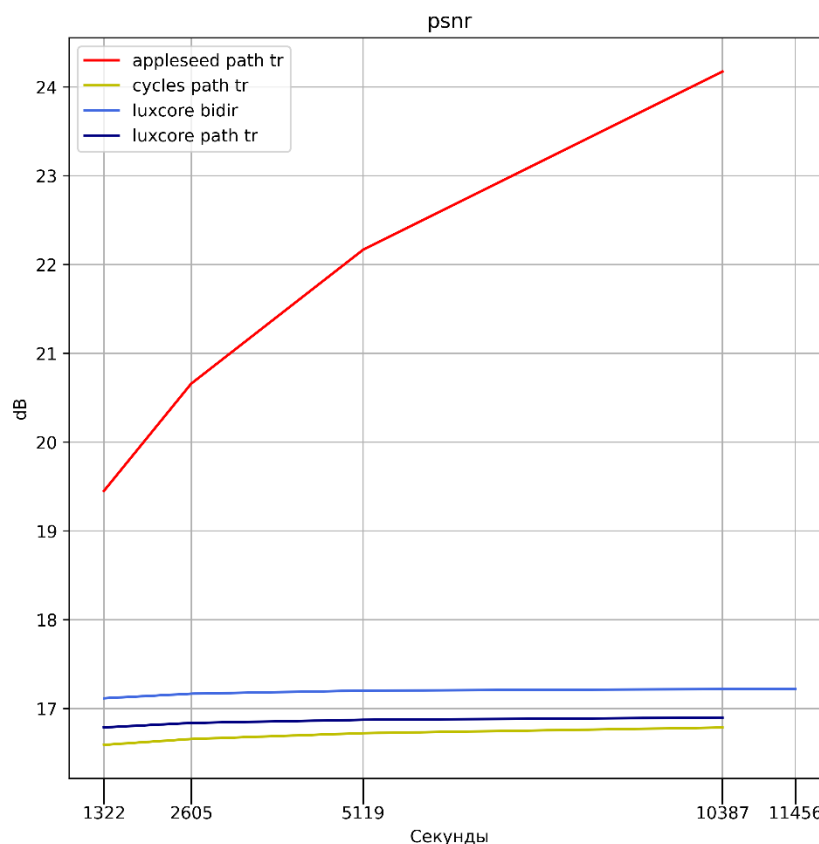


Рис.6 Зависимость качества от времени работы рендеров.

В данном эксперименте были протестированы алгоритмы трассировки пути каждого рендера, а также двунаправленная трассировка рендера luxcore. Из рис. 6 видно, что наибольшую реалистичность показал рендер appleseed. Это опять же связано с тем, что эталонное изображение было получено с помощью этого рендера и можно сделать выводы, аналогичные прошлому эксперименту. Остальные алгоритмы показали приблизительно схожие друг с другом результаты. Но тем не менее, на рис. 7 видно, что алгоритм двунаправленной трассировки показал лучшее приближение к эталону за то же время по сравнению с трассировкой пути. Это связано с тем, что алгоритм двунаправленной трассировки с использованием metropolis sampling значительно быстрее просчитывает световые пути, вносящие вклад в результирующее изображение.

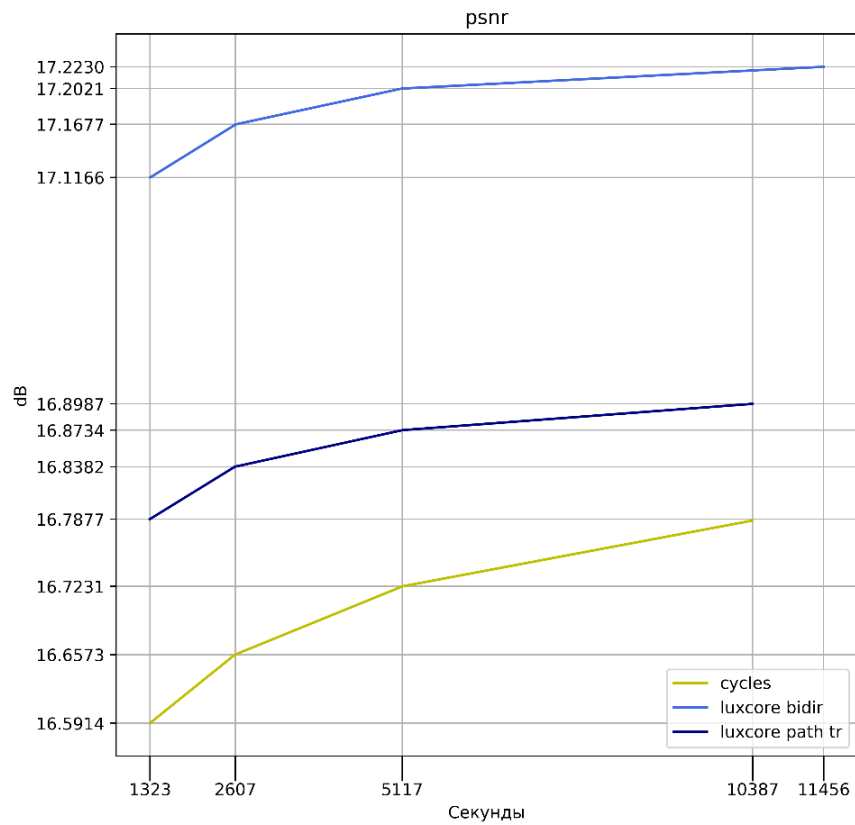


Рис.7 Зависимость качества от времени работы рендеров cycles и luxcore.

Эксперимент 4

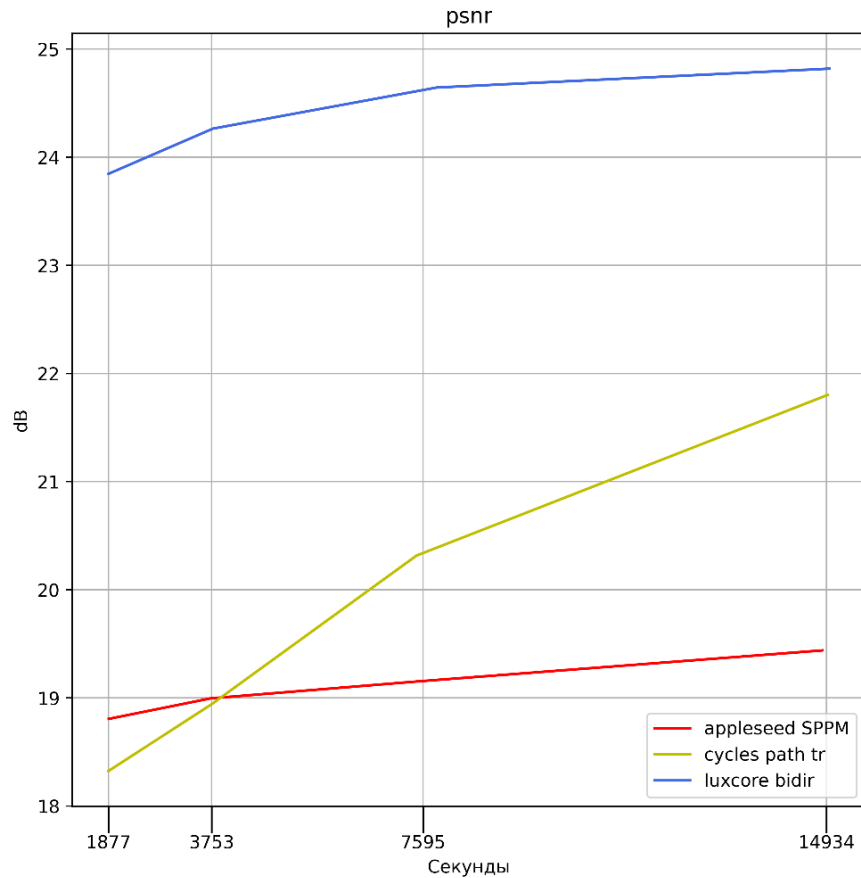


Рис.8 Зависимость качества от времени работы рендеров.

В данной сложной сцене источник освещения находился за стеной, что ограничивало его влияние на окружающее освещение. Световые лучи двигались по стеклянной трубке с показателем преломления $IOR = 1.9$ (Приложение В, рис. 5). Наилучшее качество показал алгоритм двунаправленной трассировки пути рендера luxcore. Трассировка пути, реализованная в Cycles, как видно из рис. 8 постепенно приближается к эталону. Рендер appleseed использовал SPPM, который с самого начала выдал сильно зашумленный результат и с течением времени смог лишь незначительно его улучшить. Такой результат объясняется моделью самой сцены. В данной сцене присутствует большое количество непрямого освещения от интенсивного света, источник которого «скрыт». Алгоритм двунаправленной трассировки пути хорошо справляется с данного рода сценами, потому что создается один верный путь светового луча, который гарантированно связывает камеру и источник света. В SPPM же информация об освещении собирается отдельно от первого этапа, из-за этого генерируются артефакты, так называемые, светлячки (англ. fireflies), выражаемые яркими белыми точками и пятнами на изображении, которые и вносят ошибку.

Эксперимент 5

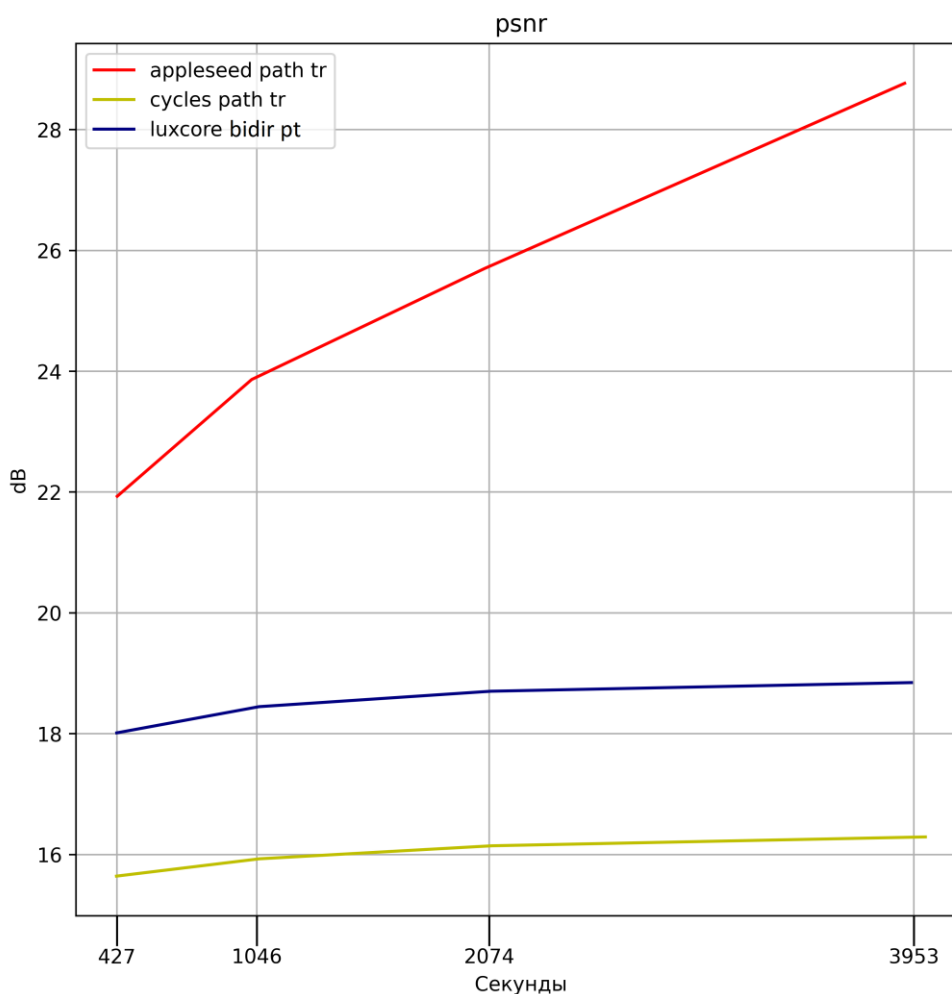


Рис. 9 Зависимость качества от времени работы рендеров.

В данном эксперименте относительно качества appleseed можно сделать выводы, аналогичные выводам второго эксперимента. Из данного графика видно, что рендер appleseed, используя трассировку пути, получил наиболее реалистичный результат, схожий с эталоном. В данной сцене оба источника освещения находятся в области видимости камеры, что делает предпочтительным алгоритм трассировки пути. В LuxCore использовался алгоритм двунаправленной трассировки, который, как видно из рис. 9, подкрепил результаты третьего эксперимента, выдавая более качественный результат за то же время рендеринга, относительно трассировки пути в Cycles.

Заключение

В представленном исследовании произведено сравнение рендеров appleseed, Cycles и Luxcore по качеству построенных изображений трёхмерных сцен. Результаты их работы сравнивались при ограниченном времени работы и была рассмотрена динамика улучшения качества изображения при увеличении времени работы.

Данный способ сравнения качества путём бескомпромиссного рендеринга лучшим рендером и сравнения с остальными по PSNR корректно отражал результаты экспериментов, состыкуясь с визуальной оценкой автора. Однако оценивание с помощью метрики PSNR все же остается лишь приближенным к человеческому видению. Это видно по результатам третьего эксперимента, когда метрика определила схожесть, но не учла различие в способах рассеивания света тканью. Возможно, для данного эксперимента лучше подойдет метрика PSNR-HVS-M, описанная в [40], которая учитывает контрастность и визуальную маскировку (англ. visual masking).

В большинстве тестов наиболее фотореалистичным являлся рендер appleseed. Стандартная трассировка пути является стандартным и хорошим выбором во многих ситуациях. Этот алгоритм надежен и поэтому используется во всех производственных движках рендеринга.

Для сцен с большим количеством непрямого освещения, с небольшим по размерам, но интенсивным или непопадающим в область видимости камеры источником света двунаправленная трассировка пути является лучшим выбором.

Для сцен с большим количеством каустических эффектов алгоритм SPPM является лучшим выбором, потому что он может визуализировать зеркально-диффузно-зеркальные пути (англ. specular-diffuse-specular paths), хоть и имеет высокий уровень расхода памяти. Двунаправленная трассировка справляется с этим с трудом.

Таким образом для моделей в которых преобладает не прямое освещение, лучше использовать двунаправленный алгоритм, в котором лучи трассируются как из источников освещения, так и из камеры – SPPM в appleseed или bidirectional path tracing в LuxCore. Для простых моделей с преобладанием прямого освещения для наиболее качественного результата следует использовать трассировку пути, реализованную в рендере appleseed, если же в приоритете является время рендеринга, то лучшим выбором будет рендер Cycles.

Список использованных источников

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т. IV. Оптика. — 3-е изд., стереот. — М.: ФИЗМАТЛИТ. — 2005. — 792 с. — ISBN 5-9221-0228-1.
2. Электронный учебник по курсу "Основы оптики" URL: http://aco.ifmo.ru/el_books/basics_optics/ (дата обращения 10.05.2020)
3. Bruce Walter, Stephen R. Marschner, Hongsong Li, Kenneth E. Torrance Microfacet Models for Refraction through Rough Surfaces Proceedings of the 18th Eurographics Conference on Rendering Techniques. — 2007. — 195-206 P. doi:10.2312/EGWR/EGSR07/195-206.
4. Kajiya, James T. The rendering equation // Siggraph 1986. — 1986 — P. 143–150. — doi:10.1145/15922.15902
5. Matt Pharr, Wenzel Jakob, Greg Humphreys Physically Based Rendering: From Theory To Implementation. — 2018. — 1226 P.
6. Альбе́до в реалистичной визуализации URL: <https://render.ru/ru/m.trofimov/post/11166> (дата обращения 28.04.2020)
7. Marco Alamia Physically Based Rendering URL: http://www.codinglabs.net/article_physically_based_rendering.aspx (дата обращения 5.05.2020)
8. Physically Based Shading in Theory and Practice // SIGGRAPH 2013 Course URL: <https://blog.selfshadow.com/publications/s2013-shading-course/> (дата обращения 5.05.2020)
9. Brian Karis Specular BRDF Reference URL: <http://graphicants.blogspot.com/2013/08/specular-brdf-reference.html> (дата обращения 18.05.2020)
10. Bruce G. Smith Geometrical shadowing of a random rough surface // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. — 1967. — 668-671 P. doi:10.1109/TAP.1967.1138991
11. Brent Burley Physically-Based Shading at Disney // SIGGRAPH 2012 Course: Practical Physically Based Shading in Film and Game Production. — 2012. doi:10.1145/2343483. — URL: <https://blog.selfshadow.com/publications/s2012-shading-course/> (дата обращения 12.05.2020)
12. Ole Gulbrandsen Artist Friendly Metallic Fresnel // Journal of Computer Graphics Techniques (JCGT). — 2014. — Vol. 3, No. 4. — 64-72 P.
13. Appleseedhq, appleseed shaders URL: <https://github.com/appleseedhq/appleseed/tree/master/src/appleseed.shaders/src/appleseed> (дата обращения 16.05.2020)
14. Michael Oren and Shree K. Nayar. Generalization of lambert's reflectance model. // In Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and

- Interactive Techniques, SIGGRAPH '94, 239–246. 1994. ACM. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/192161.192213>.
15. Brent Burley Extending the Disney BRDF to a BSDF with Integrated Subsurface Scattering // SIGGRAPH 2015. – 2015. – URL: https://blog.selfshadow.com/publications/s2015-shading-course/burley/s2015_pbs_disney_bsdf_notes.pdf (дата обращения 12.05.2020)
 16. Diffuse BSDF Cycles Shader URL: https://docs.blender.org/manual/en/latest/render/shader_nodes/shader/diffuse.html (дата обращения 15.05.2020)
 17. Emission Cycles Shader URL: https://docs.blender.org/manual/en/latest/render/shader_nodes/shader/emission.html (дата обращения 15.05.2020)
 18. Cook R.L., Torrance K.E. A Reflectance Model for Computer Graphics // ACM Transactions on Graphics. – 1982. – Vol. 1.
 19. Christophe Schlick An inexpensive BRDF model for Physically-based Rendering // Eurographics 94, Computer Graphics Forum. – 1994. – Vol.13, No. 3. – 233-246 P.
 20. А. В. Боресков Программирование компьютерной графики. Современный OpenGL. – М.: ДМК Пресс. – 2019. – 372 с.: ил.
 21. Glossy BSDF Cycles Shader URL: https://docs.blender.org/manual/en/latest/render/shader_nodes/shader/glossy.html (дата обращения 15.05.2020)
 22. Glass BSDF Cycles Shader URL: https://docs.blender.org/manual/en/latest/render/shader_nodes/shader/glass.html (дата обращения 15.05.2020)
 23. Principled BSDF Cycles Shader URL: https://docs.blender.org/manual/en/latest/render/shader_nodes/shader/principled.html (дата обращения 15.05.2020)
 24. Refraction BSDF Cycles Shader URL: https://docs.blender.org/manual/en/latest/render/shader_nodes/shader/refraction.html (дата обращения 15.05.2020)
 25. Transparent BSDF Cycles Shader URL: https://docs.blender.org/manual/en/latest/render/shader_nodes/shader/transparent.html (дата обращения 15.05.2020)
 26. LuxCoreRender Materials Glass URL: https://wiki.luxcorerender.org/LuxCoreRender_Materials_Glass#Reflection_Color (дата обращения 16.05.2020)
 27. LuxCoreRender Materials Matte URL: https://wiki.luxcorerender.org/LuxCoreRender_Materials_Matte (дата обращения 16.05.2020)
 28. LuxCoreRender Materials Matte Translucent URL: https://wiki.luxcorerender.org/LuxCoreRender_Materials_Matte_Translucent (дата обращения 16.05.2020)
 29. LuxCoreRender Materials Mirror URL: https://wiki.luxcorerender.org/LuxCoreRender_Materials_Mirror (дата обращения 16.05.2020)
 30. LuxCoreRender Materials Glossy URL: https://wiki.luxcorerender.org/LuxCoreRender_Materials_Glossy (дата обращения 16.05.2020)

31. LuxCoreRender Materials Glossy Translucent URL: https://wiki.luxcorerender.org/LuxCoreRender_Materials_Glossy_Translucent (дата обращения 16.05.2020)
32. LuxCoreRender Materials Metal URL: https://wiki.luxcorerender.org/LuxCoreRender_Materials_Metal (дата обращения 16.05.2020)
33. asDisneyMaterial appleseed Shader URL:
https://appleseed.readthedocs.io/projects/appleseed-maya/en/latest/shaders/material/as_disney_material.html?highlight=Disney#asdisneymaterial (дата обращения 16.05.2020)
34. László Szirmay-Kalos Monte-Carlo Methods in Global Illumination // VDM Verlag Dr. Müller. – 2008. – 136 p. - ISBN-10: 9783836479196 URL:
<https://cg.iit.bme.hu/~szirmay/script.pdf> (дата обращения 16.05.2020)
35. F. J. Medina-Aguayo, R. G. Everitt Revisiting the balance heuristic for estimating normalising constants // Cornell University. – 2019. – URL:
<https://arxiv.org/pdf/1908.06514.pdf>
36. PhotonGI cache LuxCoreRender URL: <https://wiki.luxcorerender.org/PhotonGI> (дата обращения 17.05.2020)
37. Peak signal-to-noise ratio URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Peak_signal-to-noise_ratio (дата обращения 17.05.2020)
38. skimage.metrics.peak_signal_noise_ratio(...) URL: https://github.com/scikit-image/scikit-image/blob/181788f5ae16535b560e3bec44033a5b3a52cdb6/skimage/metrics/simple_metrics.py#L108 (дата обращения 17.05.2020)
39. Metropolis, N., A. Rosenbluth, M. Rosenbluth, A. Teller, and E. Teller. Equation of state calculations by fast computing machines // Journal of Chemical Physics. – 1953. – Vol. 21 (6). – doi: 10.1063/1.1699114
40. N. Ponomarenko, O. Ieremeiev, V. Lukin, K. Egiazarian, M. Carli – Modified image visual quality metrics for contrast change and mean shift accounting. – 2011. – CAD Systems in Microelectronics (CADSM). – pp. 305 - 311.
41. Best Tile Size for Blender Internal Renderer and Cycles. URL:
<https://blender.stackexchange.com/questions/3120/best-tile-size-for-blender-internal-renderer-and-cycles> (дата обращения 17.05.2020)
42. Цветовое пространство YCrCb. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/YCbCr> (дата обращения 17.05.2020)

Приложение А

1. Псевдокод алгоритма Path-tracing

```
1. Trace(ray){
2.     (object, vec_x) = FirstIntersect(ray)
3.     if !(intersection) // нет пересечения
4.         return L_sky
5.
6.     color = L_e(vec_x, -ray.direction ) + DirectLightsource(vec_x, -ray.direction)
7.     prob = BRDFSampling(-ray.direction, normal, newray)
8.     if (prob == 0)
9.         return color
10.
11.    color += Trace(newray) * w(newray.direction, normal, -ray.direction)/prob
12.    return color
13.}
```

2. Псевдокод алгоритма SPPM

```
3. void SPPMIntegrator::Render(const Scene &scene) {
4.     // Initialize pixelBounds and pixels array for SPPM
5.     Bounds2i pixelBounds = camera->film->croppedPixelBounds;
6.     int nPixels = pixelBounds.Area();
7.     std::unique_ptr<SPPMPixel[]> pixels(new SPPMPixel[nPixels]);
8.     for (int i = 0; i < nPixels; ++i)
9.         pixels[i].radius = initialSearchRadius;
10.
11.    // Вычисление lightDistr для испускания фотонов пропорционально силе источника света
12.    std::unique_ptr<Distribution1D> lightDistr = ComputeLightPowerDistribution(scene);
13.
14.    // Perform nIterations of SPPM integration
15.    HaltonSampler sampler(nIterations, pixelBounds);
16.    // Вычисление кол-ва плиток для использования SPPM camera pass
17.    for (int iter = 0; iter < nIterations; ++iter) {
18.        // генерация SPPM видимых точек -----
19.        std::vector<MemoryArena> perThreadArenas(MaxThreadIndex());
20.        ParallelFor2D(
21.            [&](Point2i tile) {
22.                MemoryArena &arena = perThreadArenas[ThreadIndex];
23.                // Follow camera paths for tile in image for SPPM
24.            }, nTiles);
25.        // Создание сетки всех видимых точек
26.        // Allocate grid for SPPM visible points
27.        // Compute grid bounds for SPPM visible points
28.        // Compute resolution of SPPM grid in each dimension
29.        // Add visible points to SPPM grid
30.
31.        // Отслеживание траектории фотонов и объединение вклада в эя
32.        std::vector<MemoryArena> photonShootArenas(MaxThreadIndex());
33.        ParallelFor(
34.            [&](int photonIndex) {
35.                MemoryArena &arena = photonShootArenas[ThreadIndex];
36.                // Следование по пути фотона для photon_Index
37.                arena.Reset();
38.            }, photonsPerIteration, 8192);
39.
40.
41.        // Обновление значения пикселей из этого прохода фотонов
42.        for (int i = 0; i < nPixels; ++i) {
```

```

43.         SPPMPixel &p = pixels[i];
44.         if (p.M > 0) {
45.             // обновление кол-ва фотонов, радиуса поиска ближайших фотонов
46.             p.M = 0;
47.             for (int j = 0; j < Spectrum::nSamples; ++j)
48.                 p.Phi[j] = (Float)0;
49.         }
50.         // сброс VisiblePoint в пикселе
51.         p.vp.beta = 0.;
52.         p.vp.bsdf = nullptr;
53.
54.     }
55.
56.
57.     // Периодическое сохранение изображения SPPM в film
58.     if (iter + 1 == nIterations || ((iter + 1) % writeFrequency) == 0) {
59.         int x0 = pixelBounds.pMin.x;
60.         int x1 = pixelBounds.pMax.x;
61.         uint64_t Np = (uint64_t)(iter + 1) * (uint64_t)photonsPerIteration;
62.         std::unique_ptr<Spectrum[]> image(new Spectrum[pixelBounds.Area()]);
63.         int offset = 0;
64.         for (int y = pixelBounds.pMin.y; y < pixelBounds.pMax.y; ++y) {
65.             for (int x = x0; x < x1; ++x) {
66.                 // вычисление эя L для пикселя SPPM
67.                 image[offset++] = L;
68.             }
69.         }
70.         camera->film->SetImage(image.get());
71.         camera->film->WriteImage();
72.     }
73.
74. }
75.
76. }

```

3. Код нормирования яркости с помощью модуля cv2

```

1. def hisEquColor(img):
2.     ycrCb = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2YCR_CB)
3.     channels = cv2.split(ycrCb)
4.     cv2.equalizeHist(channels[0], channels[0])
5.     cv2.merge(channels, ycrCb)
6.     return ycrCb

```

4. Получившиеся в результате экспериментов изображения доступны по ссылке:
https://github.com/goginyanboris/VKR/tree/3d_experiments.

Приложение В



Рис.1. Эталонное изображение 1 эксперимента.

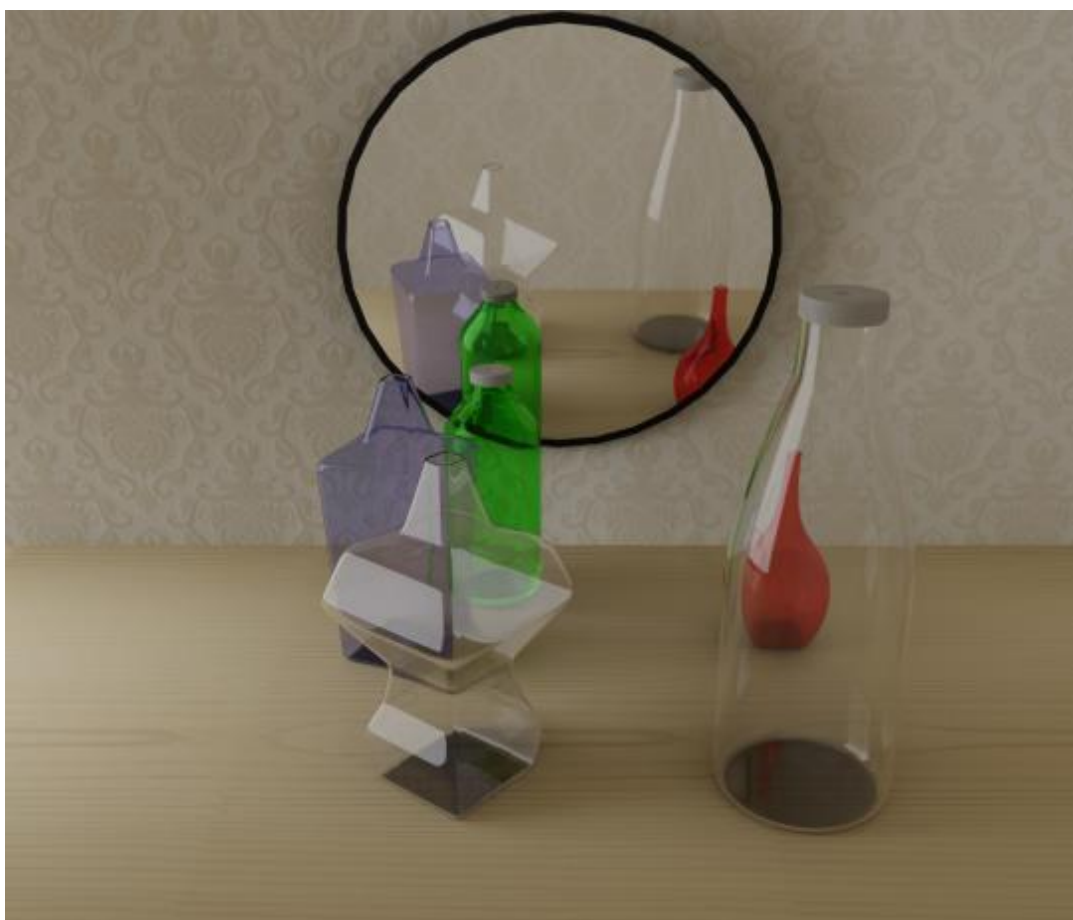


Рис. 2. Эталонное изображение 2 эксперимента.

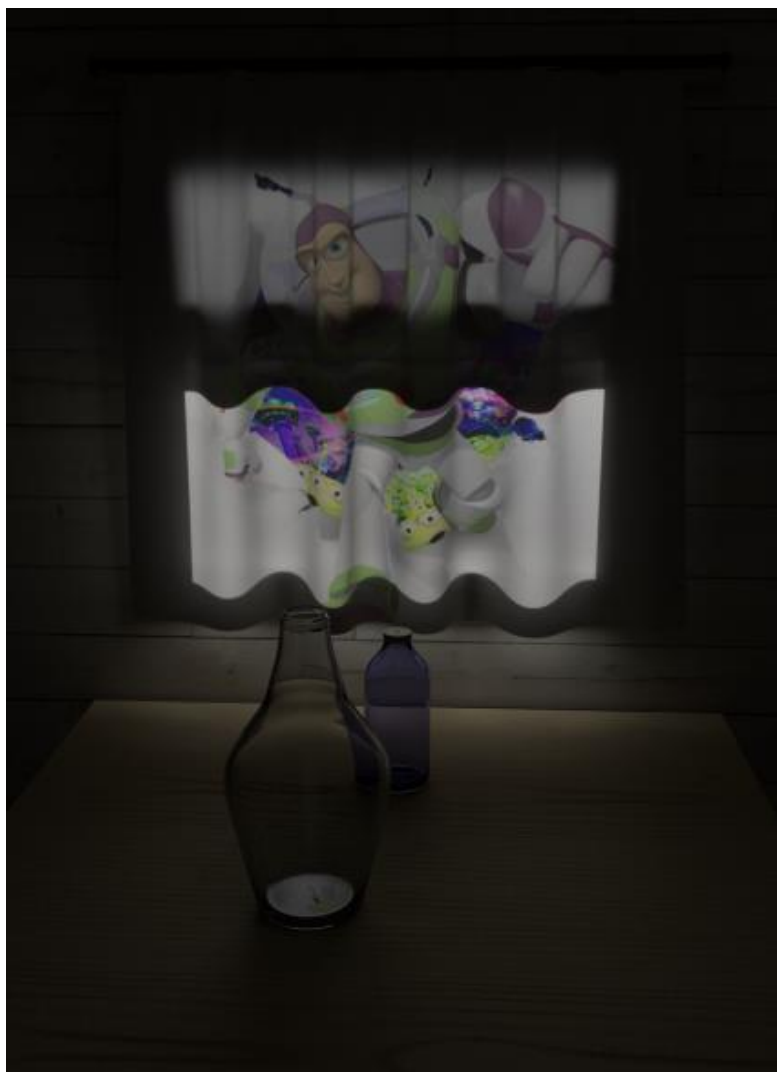


Рис.3. Эталонное изображение 3 эксперимента

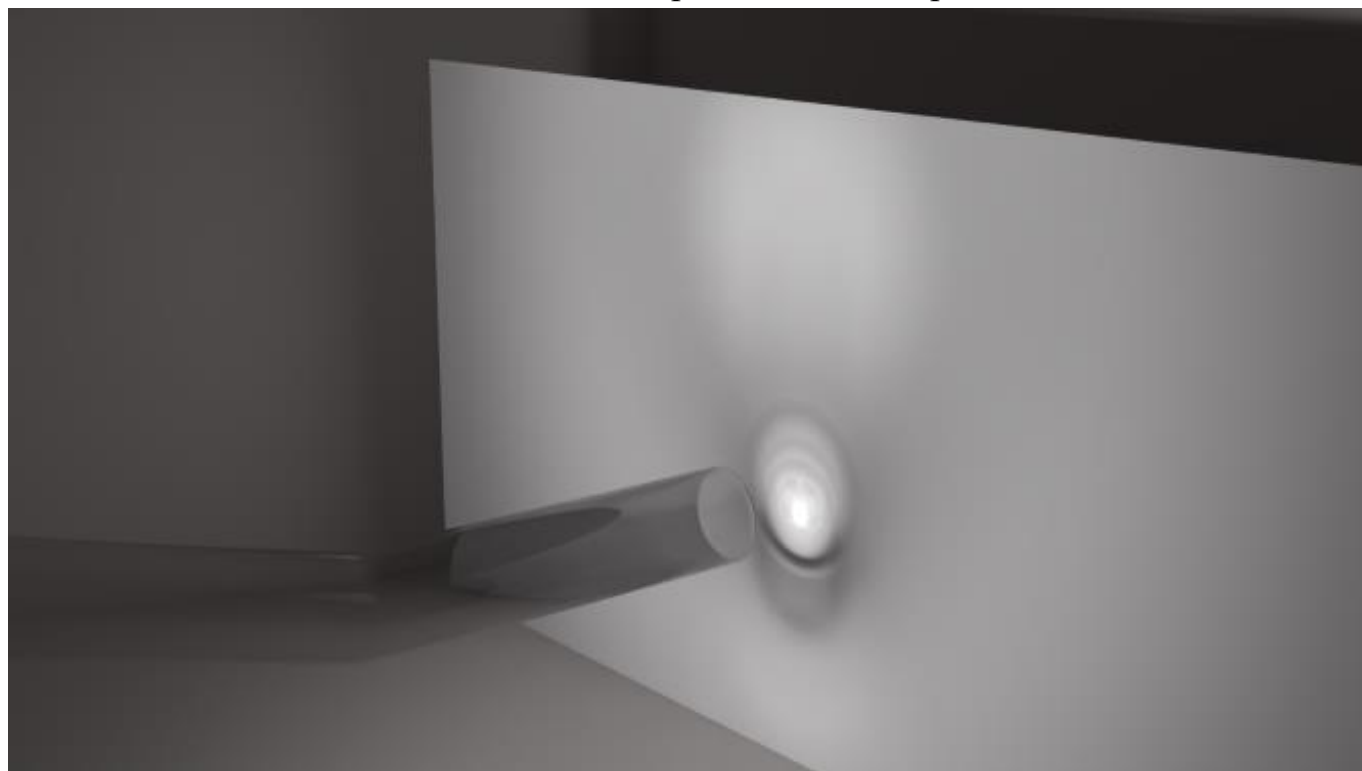


Рис. 4. Эталонное изображение 4 эксперимента.

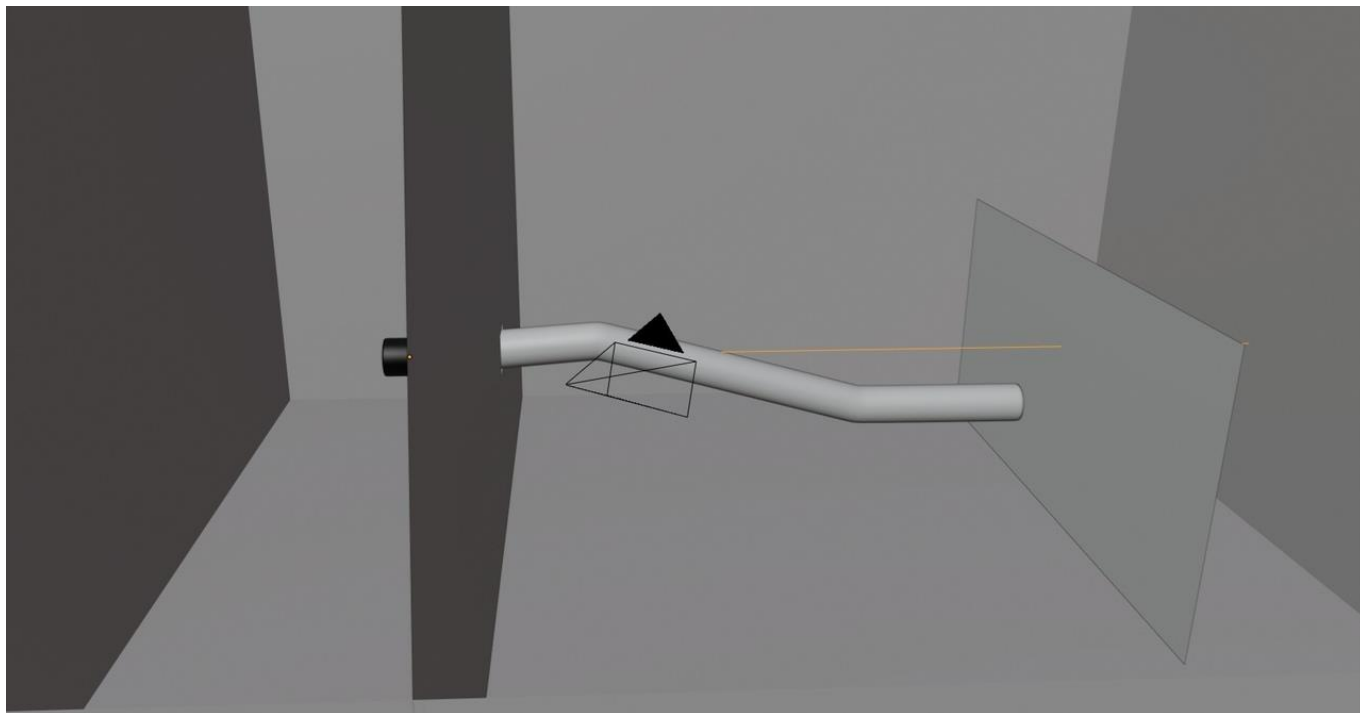


Рис. 5. 3D модель 4 эксперимента.

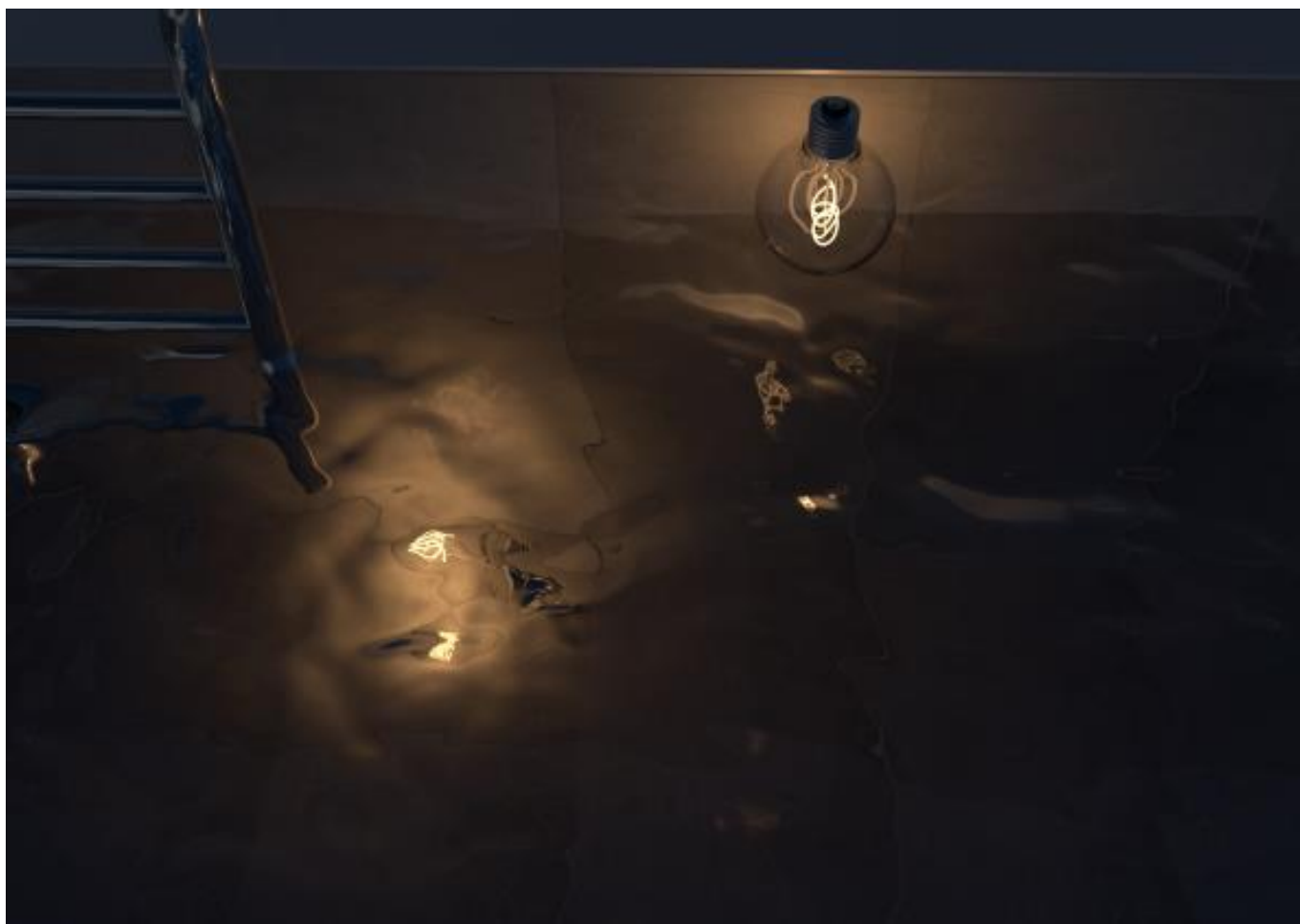


Рис. 6. Эталонное изображение 5 эксперимента.